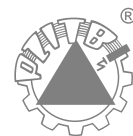


# PRZEGLĄD budowlany



97 lat

CZASOPISMO POLSKIEGO ZWIĄZKU INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW BUDOWNICTWA

NR 2/2026

2000 lat  
Politechniki  
Warszawskiej



1826

Kształcimy  
inżynierów od 200 lat



Wydział Inżynierii Lądowej  
Politechnika Warszawska

Projekt infrastrukturalny:  
**„Rozbudowa drogi krajowej nr 94 na odcinku w Olkuszu od km 294+898 do km 299+251”**



**Opis:** Na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad Oddział w Krakowie realizowane są prace przy rozbudowie DK 94 na odcinku miejskim w Olkuszu. W ramach tego zadania NDI wykonuje kompleksową przebudowę niemal 5 km odcinka drogi m.in. poprzez wzmocnienia konstrukcji nawierzchni do nośności 11,5 tony na oś, budowę bezkolizyjnego węzła wielopoziomowego wykonywanego w centralnym punkcie trasy w technologii tunelowej, budowę dwóch przejść i jednej kładki dla pieszych i przebudowę skrzyżowań. Jest to inwestycja o dużym znaczeniu społeczno – gospodarczym. Realizacja zadania pozwoli na poprawę bezpieczeństwa i płynności ruchu na jednym z najbardziej obciążonych odcinków w regionie, skracając czas przejazdów, a także zmniejszając ryzyko wypadków. Jednocześnie zwiększy komfort lokalnej społeczności dzięki redukcji hałasu, lepszej infrastrukturze dla pieszych i rowerzystów.

Projekt kubaturowy:  
**„Budowa budynku dydaktycznego wraz z garażem podziemnym polegająca na rozbudowie i przebudowie budynku biblioteki Uniwersytetu Papieskiego Jana Pawła II w Krakowie”**



**Opis:** Realizacja rozpoczętej w 2023 roku inwestycji, obejmującej budowę budynku dydaktycznego wraz z garażem podziemnym. Przedsięwzięcie polegało na rozbudowie i przebudowie istniejącego obiektu biblioteki Uniwersytetu Papieskiego Jana Pawła II w Krakowie przy ulicy Bobrzyńskiego 10. Projekt stanowi przykład harmonijnego połączenia nowoczesnych rozwiązań funkcjonalnych z poszanowaniem akademickiego charakteru uczelni. Powstała przestrzeń sprzyjająca zarówno procesowi dydaktycznemu, jak i integracji społeczności akademickiej. Realizację zakończono w grudniu 2025 roku. Zmodernizowany obiekt oddano do użytku studentom oraz władzom uczelni, zapewniając nowoczesne zaplecze dydaktyczno-administracyjne.



Wydział Inżynierii Lądowej

Politechnika Warszawska

**200 lat tradycji.  
200 lat innowacji.  
200 lat wspólnego budowania przyszłości.**

Serdecznie zapraszamy przedstawicieli świata nauki, przemysłu, biznesu, administracji, absolwentów, studentów oraz całą społeczność akademicką do udziału w wyjątkowych obchodach jubileuszu 200-lecia Politechniki Warszawskiej oraz Wydziału Inżynierii Lądowej

# **KONGRES INŻYNIERII LĄDOWEJ PW**

200 lat tradycji  
wyzwania i perspektywy rozwoju

w dniach 11-12 czerwca 2026 r.



MIĘDZYPOKOLENIOWY

## **BAL JUBILEUSZOWY**

WYDZIAŁU INŻYNIERII LĄDOWEJ  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

13 CZERWCA 2026

20.00 - 4.00

Szczegóły wydarzeń i rejestracja  
<https://www.il.pw.edu.pl/200lecie-wilpw/>



**200**

lat  
Politechniki  
Warszawskiej

# PRZEGLĄD budowlany

Marzec-Kwiecień 2026

„Przeгляд 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, wzmocnienie i renowacje obiektów budowlanych,
- badania służące rozwiązywaniu problemów technicznych inżynierii lądowej,
- narzędzia informatyczne służące procesowi budowlanemu,
- 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 „Przeглядzie Budowlanym” uzyskuje 40 pkt.

„Przeгляд 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.przeглядbudowlany.pl  
Wersja papierowa czasopisma  
jest wersją pierwotną



#### Redaktor Naczelna:

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

**Marketing i reklama:** reklama@przeглядbudowlany.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 Konferencja MPPZ 2025 – infrastruktura transportowa wobec wyzwań klimatycznych – Adam Wysokowski
- 6 Jubileusz 80-lecia urodzin prof. dr. hab. inż. Wiesława Buczkowskiego – Anna Szymczak-Graczyk
- 8 V Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Pożarowe Obiektów Budowlanych” – Marcin Chybiński, Łukasz Polus
- 10 I Ogólnopolska Konferencja „Dzień Wielkiej Płyty” – Marlena Kucz, Marcin Kanoniczak
- 13 Jubileusz 70-lecia Instytutu Badawczego Dróg i Mostów
- 14 Forum Kobiet 2026 – inspiracja i praktyczna wiedza dla przyszłych inżynierek – Katarzyna Nowak
- 15 Nowa Ja, budownictwo, które działa mądrzej – Agata Chorzempa
- 16 Nie! Bezpieczna budowa
- 17 Moderna PORR: partnerstwo dla prefabrykacji i przyszłości budownictwa
- 18 Jubileusz 80 Lat Kształcenia na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie – Grzegorz Majewski, Eugeniusz Koda, Janusz Kubrak

### RYNEK BUDOWLANY

- 20 Stan cieplno-wilgotnościowy osadzenia okien i drzwi w murach – Jerzy Bogdan Zembrowski

### POROZUMIENIE DLA BEZPIECZEŃSTWA W BUDOWNICTWIE

- 24 Prace na wysokości – pierwszy temat w cyklu o Standardach Bezpieczeństwa Porozumienia dla Bezpieczeństwa w Budownictwie – Urszula Gawrysiak
- 26 Standardy Bezpieczeństwa
- 35 Branża budowlana ponownie razem na rzecz bezpieczeństwa

### ARTYKUŁY PRZEGLĄDOWE

#### JUBILEUSZ 200-LECIA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ – STUDENCKI RUCH NAUKOWY NA WIL PW

- 36 Słowo wstępne od Dziekana – Andrzej Garbacz
- 37 Sukces na wielu autorów. Studencki ruch naukowy jako siła Wydziału – Wioletta Jackiewicz-Rek
- 38 Droga do zawodu inżyniera budownictwa na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej – Małgorzata Superczyńska
- 41 U progu 40-lecia Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych – Andrzej Oniszczuk
- 45 Sukcesy interdyscyplinarnych zespołów studentów Politechniki Warszawskiej w konkursie SPB – wzorowa współpraca architektów i konstruktorów – Piotr Knyziak
- 48 Międzywydziałowy projekt interdyscyplinarny BIM – czyli Project Based Learning w dydaktyce Wydziału Inżynierii Lądowej i Politechniki Warszawskiej – Ireneusz Czmocho
- 56 Projektowanie bez doświadczenia, nauka na błędach. Ćwiczenia laboratoryjne na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej – Bartłomiej Piróg, Widurska, Kinga Kapuścińska, Maria Włodarczyk, Robert Kowalski
- 61 Ogólnopolski sukces konkursu „Dźwigar w Dechę 2026” organizowanego przez Wydział Inżynierii Lądowej oraz Koło Naukowe Konstrukcji Metalowych – Wiktoria Matyga, Zofia Tylman, Paweł Galemba, Dominik Pacholec, Maciej Cwyl
- 64 Koło Naukowe Mostowców Politechniki Warszawskiej – wspólne sukcesy na polu mostowo-tunelowym – Wojciech Karwowski, Szymon Napiórkowski, Paweł Pachla
- 70 Interdyscyplinarne projekty Międzywydziałowego Koła Naukowego Smart City na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej – Karol Duszczyk, Bartosz Bagiński, Bartosz Jaworski, Natalia Kaniecka, Jakub Romański, Izabella Wątor, Dorota Wolińska
- 74 Koło Naukowe BIMgo – od początku i od środka, a zatacza coraz większe kręgi – Ireneusz Czmocho, Emilia Dudzińska, Kamil Grzebalski, Krzysztof Kaczor, Weronika Kowal-Szabelska, Jakub Milczarek, Michał Nowakowski, Jakub Walendzik
- 78 „WILbołtka” w konkursie Krakow Concrete Canoe Challenge – Aleksandra Derda, Jakub Zabawski, Zuzanna Miecznikowska, Maciej Bielecki, Maciej Kalinowski

**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 Nowogońska

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 Nowogońska

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

**Okladka:** Jubileusz 200-lecia Politechniki Warszawskiej

Cena 1 egz. 44,00 zł (plus 8% VAT)

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

**DTP:** mediaNOVA Jacek Gacukowicz **Drukarnia:** Edit

Materiałów niezamówionych redakcja nie zwraca i zachowuje sobie prawo do skrótów, zmian tytułów i wprowadzania

śródtytułów. Nie ponosi też odpowiedzialności za treść reklam.

**ARTYKUŁY PROBLEMOWE**

- 83** Wpływ nanomodifikatora TiO<sub>2</sub> na skurcz wczesny betonu – Aleksandra Derda, Wioletta Jackiewicz-Rek
- 86** Budowla historyczna – współczesny projekt: żelbetowa konstrukcja ponadczosowej muryowej budowli sakralnej – Kinga Kapuścińska, Maria Włodarczyk
- 90** Od tradycji do automatyzacji. Zastosowanie modelowania parametrycznego w projektowaniu konstrukcji żelbetowych na przykładzie budynku laboratorium – Bartłomiej Piróg, Maria Włodarczyk
- 94** Ocena wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego za pomocą autorskiej metody analizy obrazu – Jakub Zabawski, Wioletta Jackiewicz-Rek
- 102** Badania doświadczalne zarysowania płyt na podłożu sprężystym poddanych lokalnemu obciążeniu – Rafał Roszczenko, Adrian Saczko, Monika Urbaniak, Kornelia Bińczyk, Szczesna Patrycja, Maria Włodarczyk, Marcin Gajewski
- 108** Analiza zagadnienia korozji biologicznej w budownictwie wielkopłytowym – Agnieszka Kaliszuk-Wietecha, Zofia Wlazłowska, Ewa Ludwiszewska, Julia Piotrowska, Natalia Sawczuk
- 113** Trajektorie i warstwy naprężeń głównych oraz ekstremalnego ścinania w belce o przekroju teowym wykonanej z materiału jednorodnego – Filip Skwarek, Aleksander Swzed, Inez Kamińska
- 116** Analiza numeryczna kasetonów elewacyjnych wykonanych z aluminium, stali lub stali kortenowskiej – Maciej Cwyl, Paweł Galemba, Mateusz Konopka, Michał Prochera
- 119** Współczesne zastosowania okładzin z blach w ścianach wentylowanych – Maciej Cwyl, Paweł Galemba, Emil Komuda, Piotr Porycki, Michał Prochera
- 122** Wielka płyta – od innowacji do wyzwania – badania termowizyjne – Szymon Firląg, Iga Błaszczewicz, Bartłomiej Szulc

**KONSTRUKCJE – ELEMENTY – MATERIAŁY**

- 126** Wpływ średnicy i ilości dozowania włókien polimerowych na wczesny skurcz zapraw cementowych – Karolina Iwańska, Adam Zieliński
- 130** Obliczanie odkształceń i naprężeń w przekrojach żelbetowych w zakresie nieliniowego pełzania – Krzysztof Klempka, Kamil Gryziec
- 136** Synergiczny wpływ dodatku lateksu SBR i metod pielęgnacji na redukcję skurczu zapraw cementowych – Małgorzata Lenart, Maciej Gruszczynski
- 141** Cement wieloskładnikowy sposobem na produkcję betonu o obniżonym śladzie węglowym – Albert Grajek, Wioletta Raczkiewicz, Kamil Bacharz
- 146** „Concrete Wyzwanie” – projektowanie składu mieszanek betonowych o niskim śladzie węglowym – Damian Kozak, Małgorzata Wójcik

**PROJEKTOWANIE ARCHITEKTONICZNE**

- 152** O tendencjach w kształtowaniu architektonicznym stadionów do piłki nożnej – Aleksandra Torberntsson, Hanna Michalak, Jacek Kwiatkowski

**ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA**

- 157** Promieniotwórcze zagrożenia w budownictwie – Aleksandra Ubysz, Marek Maj, Andrzej Ubysz

**SZTUCZNA INTELIGENCJA**

- 161** Przegląd wybranych narzędzi sztucznej inteligencji wykorzystywanych w zarządzaniu realizacją inwestycji budowlanych – Mikołaj Mosiak, Agata Stec, Tomasz Nowobilski

**ENERGIA SŁONECZNA W BUDOWNICTWIE**

- 166** Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie w celu wzmocnienia efektu kominowego – Romana Antczak-Jarząbska

**PRACE DYPLOMOWE**

- 172** Symulacja CFD oddziaływania wiatru na otwartą konstrukcję parkingu wielopoziomowego – Kacper Marciniak, Michał Goldyn

**WSPOMNIENIA**

- 178** Prof. dr hab. inż. Piotr Konderla 1943–2025

# Konferencja MPPZ 2025 – infrastruktura transportowa wobec wyzwań klimatycznych

10 i 11 grudnia 2025 r. w Zielonej Górze odbywała się XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Mosty, przepusty i przejścia dla zwierząt – infrastruktura wobec wyzwań klimatycznych i zjawisk ekstremalnych.

Wydarzenie poświęcono problematyce odporności infrastruktury komunikacyjnej na zmiany klimatu oraz rosnącą skalę zjawisk ekstremalnych.



Panel dyskusyjny: prof. A. Wysokowski, prof. J. Bohatkiewicz, prof. J. Biliszczuk, prof. J. Rymsza

Tegoroczna edycja odbyła się w szczególnym kontekście – nasilających się w ostatnich latach intensywnych opadów, powodzi, silnych wiatrów oraz coraz częstszych epizodów skrajnych temperatur. Zjawiska te przestają mieć charakter incydentalny i w sposób trwały wpływają na warunki projektowania, budowy i eksploatacji obiektów inżynierskich w ciągach dróg i linii kolejowych.

W kolejnych sesjach dominowały zagadnienia związane z:

- trwałością mostów i przepustów w warunkach rosnących obciążeń środowiskowych
- projektowaniem i modernizacją konstrukcji gruntowo-powłokowych
- zabezpieczeniami obiektów przed skutkami powodzi i podtopień
- diagnostyką i oceną stanu technicznego obiektów po zdarzeniach ekstremalnych
- adaptacją infrastruktury transportowej do zmian klimatu.

Szczególne wartości miały prezentacje odwołujące się do konkretnych realizacji oraz doświadczeń z ostatnich lat, w tym do skutków powodzi z 2024 r. Dzięki temu konferencja nie ograniczała się do rozważań teoretycznych, lecz miała wyraźnie aplikacyjny charakter. Istotnym i nowym elementem tegorocznej edycji konferencji

Prof. Beata Nowogońska Dyrektor Instytutu Budownictwa UZ



była specjalna sesja poświęcona zagadnieniom infrastruktury w sytuacjach nadzwyczajnych i kryzysowych. W obliczu zmieniającej się sytuacji geopolitycznej oraz doświadczeń płynących z ostatnich konfliktów zbrojnych uznano za zasadne rozszerzenie dyskusji o aspekty związane z odpornością obiektów inżynierskich na zagrożenia o charakterze militarnym i hybrydowym.

Zwrócono uwagę, że współczesne podejście do projektowania infrastruktury transportowej powinno uwzględniać nie tylko klasyczne oddziaływania klimatyczne i eksploatacyjne, lecz także scenariusze o charakterze nadzwyczajnym. Analizowano możliwości zwiększania redundancji układów konstrukcyjnych, ochrony kluczowych elementów nośnych oraz minimalizowania skutków uszkodzeń lokalnych.

W kontekście mostów składanych podkreślono ich znaczenie jako elementu systemu reagowania kryzysowego – zarówno w przypadku klęsk żywiołowych, jak i sytuacji o charakterze militarnym. Omawiano doświadczenia związane z szybkim odtwarzaniem ciągów komunikacyjnych oraz logistyczne i techniczne uwarunkowania ich wdrażania.

Duże zainteresowanie wzbudziła również problematyka oddziaływania dronów UAV na infrastrukturę. Wskazano na konieczność prowadzenia analiz odporności konstrukcji na uszkodzenia lokalne, rozważania dodatkowych zabezpieczeń newralgicznych stref obiektów oraz potrzebę opracowania wytycznych projektowych uwzględniających nowe typy zagrożeń.

Jednym z kluczowych punktów programu był panel dyskusyjny poświęcony kierunkom rozwoju infrastruktury komunikacyjnej w perspektywie najbliższych lat.

Dyskusja koncentrowała się na kilku zasadniczych kwestiach:

- granicach technicznych i środowiskowych rozwoju infrastruktury
- wpływie rosnących wymagań formalnych na proces inwestycyjny
- potrzebie racjonalizacji wydatków publicznych przy jednoczesnym podnoszeniu standardów bezpieczeństwa
- konieczności aktualizacji wytycznych projektowych w kontekście nowych zagrożeń klimatycznych.

Podkreślono, że przyszłość infrastruktury transportowej będzie zależeć nie tylko od postępu technologicznego, lecz również od jakości regulacji,



Prezes PIIB Mariusz Dobrzeńiecki wręcza pamiątkową statuetkę prof. Adamowi Wysokowskiemu



Prof. Adam Wysokowski z prof. Januszem Rymusz

sprawności procedur administracyjnych oraz skuteczności współpracy między uczestnikami procesu inwestycyjnego. Istotnym wątkiem konferencji była problematyka przejść dla zwierząt jako integralnego elementu systemów transportowych. Wskazano, że dalszy rozwój w tym obszarze nie powinien polegać wyłącznie na mechanicznym zwiększaniu parametrów geometrycznych obiektów. Kluczowe znaczenie przypisano właściwemu rozpoznaniu lokalnych uwarunkowań środowiskowych, analizie rzeczywistego wykorzystania przejść przez faunę, podejmowaniu decyzji projektowych w oparciu o dane empiryczne.

Wydarzenie miało również wymiar jubileuszowy. Uhonorowano 70-lecie prof. Adama Wysokowskiego – inicjatora

i wieloletniego animatora konferencji, którego działalność znacząco wpłynęła na rozwój dyskusji o nowoczesnym i zrównoważonym mostownictwie w Polsce.

Po kilkuletniej przerwie powrót konferencji spotkał się z dużym zainteresowaniem i pozytywnym odbiorem uczestników. Zapowiedziano organizację jubileuszowej, XV edycji konferencji w grudniu 2027 r.

**prof. dr hab. inż. Adam Wysokowski**  
**Kierownik Zakładu Inżynierii Drogowej,**  
**Kolejowej, Mostów i Tuneli**  
**Instytut Budownictwa, Uniwersytet Zielonogórski**  
**Przewodniczący Związku Mostowców RP**



## XIV KONFERENCJA NAUKOWA KONSTRUKCJE ZESPOŁONE 2026

### Zielona Góra 25–26.VI. 2026 r.

ORGANIZATORZY



#### TEMATYKA KONFERENCJI

- Teoria • Wzmocnienia • Badania •
- Normalizacja • Realizacje •
- Nowe technologie • Diagnostyka •
- Perspektywy rozwoju • Projektowanie •

W ramach konferencji zostaną wygłoszone zamawiane dwa referaty problemowe.

Najpóźniej do dnia **15.04.2026 r.** należy przesłać wcześniej zgłoszone referaty napisane zgodnie z wytycznymi do czasopism „Przeegląd Budowlany” i „Inżynieria i Budownictwo”.

Warunkiem opublikowania referatu w czasopismach jest wniesienie opłaty konferencyjnej do dnia **15.05.2026 r.**

#### OPŁATA KONFERENCYJNA

Opłata konferencyjna wynosi 1800 zł (1200 zł dla uczestników nieprzekraczających 35 roku życia).

Ostateczny termin wniesienia opłaty do dnia **01.06.2026 r.**

Opłata konferencyjna obejmuje materiały konferencyjne, przerwy kawowe i wyżywienie (obiad i kolacja) i integracyjny wieczór inżynierski.

Organizatorzy nie pokrywają kosztów noclegów i dojazdów.

#### Rachunek bankowy

Bank Millennium 82 1160 2202 0000 0000 7343 3275

**Tytuł wpłaty:** „Konstrukcje Zespołone 2026” + imię i nazwisko.

**Odbiorca:** Lubuska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa ul. Walczaka 25, 66-400 Gorzów Wlkp.

Zgłoszenia referatów przyjmowane są poprzez formularz elektroniczny dostępny na stronie internetowej konferencji.

[www.konstrukcje-zespolone.uz.zgora.pl](http://www.konstrukcje-zespolone.uz.zgora.pl)

# Jubileusz 80-lecia urodzin prof. dr. hab. inż. Wiesława Buczkowskiego

29 stycznia 2026 roku odbyła się uroczystość jubileuszu 80-lecia urodzin oraz trwającej od 1969 roku pracy naukowej prof. dr. hab. inż. Wiesława Buczkowskiego.



Spotkanie przygotowane przez Panią Dziekan Wydziału Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu prof. dr. hab. inż. Klaudię Borowiąk i współpracowników Jubilata z Katedry Budownictwa i Geoinżynierii, a w szczególności przez wypromowanych doktorów zgromadziło przedstawicieli władz uczelni, byłych rektorów, profesorów z wielu ośrodków naukowych w kraju, pracowników, doktorantów oraz rodzinę i przyjaciół Profesora. Atmosfera uroczystości łączyła podniosłość wydarzenia akademickiego z wyraźnie odczuwalnym osobistym charakterem spotkania środowiska naukowego skupionego wokół Jubilata.

W części oficjalnej przypomniano jego rolę w rozwoju wydziału, zwłaszcza w latach 1996–2002, kiedy jako dziekan doprowadził do przeniesienia jednostki do nowej siedziby przy ul. Piątkowskiej 94, co stworzyło warunki do rozbudowy laboratoriów, rozwoju kadry i poszerzenia działalności naukowej wydziału.

Następnie odbyła się sesja naukowa przygotowana przez przyjaciół i współpracowników Profesora. Uczestnicy uroczystości otrzymali materiały jubileuszowe zatytułowane „Kiedy

teoria spotyka się z praktyką”. W jej trakcie wygłoszono referaty przez dr. hab. inż. Piotra Kowalczaaka pt. „Wpływ urbanizacji na zmiany bilansu wodnego zlewni i reżimu hydrologicznego cieków” oraz prof. dr. hab. Janusza Olejnika pt. „Czy zwiększoną produkcją drewna można walczyć z ociepleniem klimatu?”.

Wystąpienia okolicznościowe przywoływały liczne wspomnienia z pracy naukowej i dydaktycznej Jubilata. Podkreślano jego wymagania stawiane studentom i współpracownikom, ale równocześnie życzliwość i gotowość do pomocy, a także umiejętność łączenia rozważań teoretycznych z praktyką inżynierską. Uroczystość miała charakter podniosły, lecz jednocześnie serdeczny i pełen osobistych odniesień. Prof. dr. hab. inż. Wiesław Buczkowski urodził się w 1946 roku w Poznaniu i z tym miastem związał całe swoje życie zawodowe. W 1969 roku ukończył studia na Wydziale Melioracji Wodnych Akademii Rolniczej w Poznaniu, broniąc z wyróżnieniem pracy dotyczącej projektu zamknięcia jazowego na Kanale Bernardyńskim w Kaliszu, która wyznaczyła kierunek jego dalszych zainteresowań naukowych związanych z konstrukcjami hydrotechnicznymi i mechaniką budowli. Bezpośrednio po studiach rozpoczął pracę w Katedrze Mechaniki Budowli i Konstrukcji Budowlanych, gdzie rozwijał działalność badawczą dotyczącą pracy statycznej konstrukcji inżynierskich. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1977 roku po obronie pracy pt. „Numeryczne obliczenie płyt trójwarstwowych stosowanych w budownictwie rolniczym”, a stopień doktora habilitowanego w 1992 roku na podstawie rozprawy pt. „Analiza parametryczna rozkładu sił wewnętrznych w żelbetowych ustrojach skrzyniowych”. Tytuł profesora nauk technicznych został mu nadany w 2012 roku.

Zainteresowania badawcze prof. dr. hab. inż. Wiesława Buczkowskiego obejmowały analizę ustrojów płytowych obciążonych nietypowo, płyt trójwarstwowych modelu Hoffa, monolitycznych zbiorników żelbetowych, studni opuszczanych o przekroju kołowym i prostokątnym oraz konstrukcji z materiałów kompozytowych. Równolegle prowadził szeroką działalność ekspercką, projektując i oceniając stan techniczny obiektów hydrotechnicznych i infrastrukturalnych. Posiada pełne uprawnienia budowlane do projektowania i kierowania robotami w specjalności konstrukcyjno-budowlanej. Od 2001 roku, a więc od początku powstania, jest członkiem Wielkopolskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa, w której w latach 2014–2022 był przewodniczącym Okręgowej Komisji Kwalifikacyjnej.





W latach 2005–2013 pracował równolegle na drugim etapie na Wydziale Inżynierii i Kształtowania Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, gdzie współtworzył rozwój kierunku budownictwo i uczestniczył w działalności dydaktycznej oraz naukowej tej uczelni. W 2025 roku, z okazji trzydziestolecia uruchomienia studiów budowlanych w SGGW, został uhonorowany jako jeden z prekursorów tej dyscypliny na tej uczelni.

Dorobek naukowy Profesora obejmuje 165 publikacji, czternaście książek i skryptów oraz około 650 ekspertyz technicznych i opracowań specjalistycznych. Szczególną wagę przywiązywał do kształcenia młodej kadry naukowej. Do momentu przejścia na emeryturę wypromował trzech doktorów – Jacka Mądrawskiego, Tomasza Pawlaka i Annę Szymczak-Graczyk – a po 2016 roku był promotorem kolejnych dwóch przewodów doktorskich: Marty Sybis i Marka Koprasa.

Łącznie wypromował pięciu doktorów, z których czworo związało swoją dalszą działalność zawodową z uczelnią, pracując w macierzystej katedrze Jubilata.

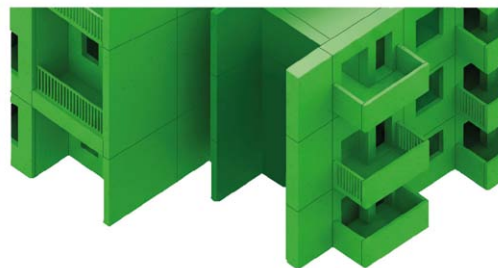
Charakterystyczną cechą jego działalności było konsekwentne łączenie teorii z praktyką. Współpracując z przedsiębiorstwami budowlanymi uczestniczył w rozwiązywaniu problemów projektowych podczas realizacji inwestycji infrastrukturalnych. Proponowane przez niego rozwiązania technologiczne umożliwiały bezpieczne posadowienie obiektów w trudnych warunkach terenowych, ograniczenie kosztów robót oraz uniknięcie uszkodzeń sąsiedniej zabudowy, co potwierdzało praktyczną wartość prowadzonych badań.

Po przejściu na emeryturę w 2016 roku nie zaprzestął działalności naukowej. Nadal recenzuje przewody doktorskie i habilitacyjne, ocenia dorobek kandydatów do tytułu profesora oraz uczestniczy w publikacjach i pracach środowiska naukowego i zawodowego.

Uroczystość jubileuszowa stała się okazją do podsumowania wieloletniej działalności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej Profesora, a zarazem wyrazem uznania środowiska akademickiego dla jego wkładu w rozwój nauk inżyniersko-technicznych i kształcenie kolejnych pokoleń inżynierów. Składamy Jubilatowi serdeczne gratulacje oraz życzenia zdrowia, pogody ducha i wszelkiej pomyślności, a także dalszej aktywności naukowej i zawodowej. Wyrażamy nadzieję na kolejne lata twórczej pracy, satysfakcję z sukcesów wychowanków oraz wiele spokojnych i radosnych chwil spędzanych w gronie najbliższych.

**dr hab. inż. Anna Szymczak-Graczyk, prof. UPP**

## Ogólnopolski konkurs: „Budynki z wielkiej płyty na nowo – rewitalizacja części wspólnych z poprawą dostępności”



Pierwszy konkurs projektowy mający na celu wyznaczenie i opracowanie standardów rewitalizacji przestrzeni wspólnych w budynkach wielkopłytowych. Strefa wejściowa powinna być komfortowa, estetyczna, użytkowa i co najważniejsze – dostępna! Zapraszamy do udziału biura projektowe, architektów i projektantów wnętrz, a także studentów – którzy czują, że mogą zaproponować nową jakość. Stwórzmy razem księgę dobrych przykładów modernizacji strefy wejściowej do budynku z likwidacją barier w celu równego dostępu m.in. dla osób z niepełnosprawnościami, osób starszych, rodziców z wózkami oraz dzieci.

W Polsce mamy kilka milionów mieszkań w budynkach wielkopłytowych. Dostęp do budynku nierzadko wymaga pokonania minimum kilku stopni, a drzwi i wielkość wiatrołapów uniemożliwiają poruszanie się z wózkiem lub np. z rowerem. Często brakuje odpowiedniego oświetlenia i oznakowania.

Konkurs obejmie projekt stref wejściowych i części wspólnych dla trzech wybranych typów budynków: System Szczeciński 11-kondygnacyjny, Rataje 11-kondygnacyjny i System Szczeciński 5-kondygnacyjny.

**Składanie prac:** do 20 maja 2026 r. • **Ocena i gala finałowa:** czerwiec-lipiec 2026 roku.

**Organizatorzy:**



Polski Związek Inżynierów  
i Techników Budownictwa  
Oddział w Poznaniu



# V Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Pożarowe Objektów Budowlanych”



4 i 5 lutego 2026 roku podczas Międzynarodowych Targów Budownictwa i Architektury BUDMA 2026 odbyła się V Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Pożarowe Objektów Budowlanych”, której tematem przewodnim było „Bezpieczeństwo budynków w obliczu nowych zagrożeń”.

Organizatorami konferencji byli: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Pożarnictwa Oddział Wielkopolski, Koło Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa przy Politechnice Poznańskiej, Instytut Analizy Konstrukcji oraz Instytut Budownictwa Politechniki Poznańskiej. Organizowana od pięciu lat konferencja stała się stałym wydarzeniem towarzyszącym targom BUDMA, stanowiącym forum do dyskusji i wymiany doświadczeń, w którym w tym roku udział wzięło około 250 uczestników. Uczestnikami konferencji byli inżynierowie budownictwa, architekci, projektanci, wykonawcy, konstruktorzy, rzeczoznawcy budowlani, strażacy PSP, rzeczoznawcy do spraw zabezpieczeń przeciwpożarowych, specjaliści i inspektorzy ochrony przeciwpożarowej, pracownicy naukowci oraz firmy związane z bezpieczeństwem pożarowym obiektów budowlanych, a także studenci.

Konferencja została objęta patronatem honorowym przez Ministerstwo Spraw Wewnętrznych i Administracji, Komendanta Głównego Państwowej Straży Pożarnej oraz Jego Magnificencję Rektora Politechniki Poznańskiej. Referaty zaprezentowali specjaliści z Politechniki Poznańskiej, Politechniki Warszawskiej, Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa, Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego – Państwowy Instytut Badawczy, Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej, Instytutu Techniki Budowlanej, Powiatowego Inspektoratu Nadzoru Budowlanego dla Miasta Poznania, Ogólnopolskiego Stowarzyszenia Producentów Zabezpieczeń Przeciwożarowych i Sprzętu Ratowniczego, Polskiego Towarzystwa Cynkowniczego oraz prelegenci niezależni.

W pierwszym dniu konferencji jej uroczystego otwarcia dokonał mgr inż. Lech Janiak, prezes zarządu Oddziału Wielkopolskiego Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa oraz prof. dr hab. inż. Wojciech Sumelka – prorektor ds. nauki Politechniki Poznańskiej. Następnie referat pt. „Historia polskich warunków technicznych dla budynków” wygłosił st. bryg. w st. spocz. mgr inż. Paweł Rochala, redaktor naczelny kwartalnika SITP „Ochrona Przeciwożarowa”. Kolejne referaty wygłosili: st. bryg. mgr inż. Ernest Ziębaczewski, dyrektor Biura Przeciwdziałania Zagrożeniom Komendy Głównej PSP z tematem „Nowelizacja wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego budynków”,



Fot. Marcin Chybiński

Mgr inż. Lech Janiak – prezes zarządu Oddziału Wielkopolskiego SITP

mgr inż. Waław Kozubal, prezes zarządu Cerbex Sp. z o.o. z tematem „Ewakuacja pojazdów elektrycznych z garażu”, mgr inż. Justyna Beczkowicz z Instytutu Techniki Budowlanej z tematem „CPR 2.0 – nowe wymagania, procedury i dokumenty odniesienia”, mgr inż. Mariusz Sobecki, przewodniczący Rady Naukowo-Technicznej SITP z tematem „Systemy awaryjnej komunikacji głosowej – łączność w budynku podczas pożaru” oraz inż. Sławomir Wojtkowski, dyrektor regionu Polon-Alfa S.A. z tematem „Panel Obsługi dla Straży Pożarnej”. W dalszej części referaty wygłosili: st. bryg. mgr inż. Rafał Szczypta, zastępca dyrektora Biura Przeciwdziałania Zagrożeniom Komendy Głównej PSP z tematem „Bezpieczeństwo pożarowe budowli ochronnych” oraz mgr inż. Monika Hyjek, menedżer ds. bezpieczeństwa pożarowego z firmy ROCKWOOL Polska Sp. z o.o. z tematem „Ochrona bierna w obiektach produkcyjno-magazynowych”.

Pierwszy dzień konferencji zamknął referat wygłoszony przez prof. dr hab. inż. Roberta Kowalskiego z Politechniki Warszawskiej zatytułowany „Co warto wiedzieć o żelbecie w obliczu narastających zagrożeń bezpieczeństwa”.

Drugi dzień konferencji rozpoczęły referaty przedstawicieli Powiatowego Inspektoratu Nadzoru Budowlanego dla Miasta Poznania. Referat pt. „Zapewnienie bezpieczeństwa w budynkach legalizowanych w trybie uproszczonym” wygłosił mgr inż. Paweł Łukaszewski, Powiatowy Inspektor Nadzoru Budowlanego dla Miasta Poznania, natomiast referat pt. „Bezpieczeństwo użytkowania budynków na podstawie doświadczeń z kontroli PINB dla Miasta Poznania” wygłosiła mgr Anna Zakrzyńska, kierownik Oddziału Inspekcji i Kontroli PINB dla Miasta Poznania.

Kolejne referaty wygłosili: mgr Przemysław Domagalski, prezes zarządu Exflo Sp. z o.o. z tematem „Zbiorniki elastyczne jako element systemu bezpieczeństwa pożarowego”, mgr inż. Piotr Szczepirot z Instytutu Techniki Budowlanej z tematem „Nowe obowiązki producentów i jednostki notyfikowanej oraz systemy oceny i weryfikacji w świetle nowego rozporządzenia CPR” oraz mgr inż. Grzegorz Sypek, Ducting Business Development Manager z firmy Promat, Etex Poland Sp. z o.o. z tematem „Garaże podziemne jako miejsca doraźnego schronienia. Wymagania funkcjonalne”. Następnie wygłoszony został referat pt. „Deklaracje właściwości użytkowych wyrobów budowlanych stosowanych w budownictwie ochronnym” przygotowany przez dr. inż. Zenona Małkowskiego, prezesa Ogólnopolskiego Stowarzyszenia Producentów Zabezpieczeń Przeciwożarowych i Sprzętu Ratowniczego. W dalszej części referaty wygłosili: st. bryg. dr hab. inż. Paweł Janik, dyrektor Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego,

Państwowy Instytut Badawczy z tematem „Ocena zgodności wyrobów służących ochronie ludności” oraz dr inż. Agnieszka Królikowska, ekspert Polskiego Towarzystwa Cynkowniczego z tematem „Powłoki cynkowe zanurzeniowe – zabezpieczenie antykorozyjne i ogniochronne”. Drugi dzień konferencji zamknął referat dr. inż. Michała Malendowskiego oraz dr. inż. Wojciecha Szymkucia z Politechniki Poznańskiej zatytułowany „Projektowanie wymaganej odporności ogniowej elementów konstrukcji”. Wygłoszone referaty poruszały aspekty legislacyjne, projektowe, materiałowe oraz praktyczne związane z ochroną i bezpieczeństwem pożarowym obiektów budowlanych. Wszystkich czytelników „Przeglądu Budowlanego” serdecznie zapraszamy do udziału w VI konferencji w przyszłym roku.

**dr inż. Marcin Chybiński**  
**dr inż. Łukasz Polus**  
**Politechnika Poznańska**

## 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:



Komitet Trwałości Budowli  
Zarządu Głównego PZITB  
PZITB Oddział Warszawski



Wydział Inżynierii Lądowej  
Politechnika Warszawska

**KONTAKT:** e-mail: [kontra@zgpzibt.org.pl](mailto:kontra@zgpzibt.org.pl), [www.kontra.il.pw.edu.pl](http://www.kontra.il.pw.edu.pl)

# I Ogólnopolska Konferencja „Dzień Wielkiej Płyty”

I Ogólnopolska Konferencja „Dzień Wielkiej Płyty” odbyła się 6.02.2026 r. ramach targów BUDMA i zgromadziła w Poznaniu przedstawicieli środowiska inżynierskiego, projektantów, architektów, zarządców budynków, naukowców oraz praktyków z całej Polski, tworząc wyjątkową okazję do wymiany doświadczeń i wiedzy na temat budownictwa wielkopłytkowego.

Spotkanie było pierwszym tego typu ogólnopolskim wydarzeniem, poświęconym zarówno aktualnemu stanowi technicznemu, jak i perspektywom modernizacji oraz poprawy jakości przestrzeni wspólnych w osiedlach wielkopłytkowych. Spotkanie rozpoczęło się od powitania uczestników przez organizatorów oraz przedstawicieli środowiska budowlanego, którzy podkreślili znaczenie problematyki wielkiej płyty w kontekście współczesnej urbanistyki i rewitalizacji miast. Otwarcie stanowiło wprowadzenie do kolejnych sesji, w których uczestnicy mogli wysłuchać wykładów eksperckich oraz wziąć udział w dyskusjach panelowych.

Pierwsza sesja poświęcona była historii budownictwa wielkopłytkowego oraz problemom eksploatacyjnym, które pojawiają się w codziennej obsłudze tych obiektów. Prelekcje wygłoszone przez poniższych ekspertów pozwoliły spojrzeć zarówno na aspekty techniczne, jak i znaczenie regularnych kontroli stanu konstrukcji: prof. dr hab. inż. Józef Jasiczak, WILiT Politechnika Poznańska, prezydent WIB – „Wprowadzenie – historia budownictwa wielkopłytkowego, aktualności i przyszłość”;

dr inż. Marcin Kanoniczak, WILiT Politechnika Poznańska, PZITB – „Problemy eksploatacyjne budynków wielkopłytkowych”; mgr inż. Paweł Łukaszewski, powiatowy inspektor nadzoru budowlanego miasta Poznania – „Stan techniczny budynków z wielkiej płyty przez pryzmat wyników kontroli zleczanych przez poznańskie spółdzielnie mieszkaniowe”; dr inż. Jarosław Szulc, Instytut Techniki Budowlanej – „Kontrolę stanu technicznego budynków wielkopłytkowych”; dr inż. Piotr Knyziak, WIL Politechnika Warszawska – „Wpływ wybuchów gazu i pożarów na integralność konstrukcyjną budynków wielkopłytkowych – analiza mechanizmów uszkodzeń i alternatywnych ścieżek przenoszenia obciążeń”.

Druga sesja płynnie nawiązywała do problemów technicznych, poruszając kwestie dostępności budynków dla osób starszych i z ograniczeniami ruchowymi oraz możliwości ich modernizacji. Poniżsi prelegenci zaprezentowali wyzwania, a także konkretne rozwiązania techniczne i organizacyjne, które podnoszą komfort życia mieszkańców:

dr hab. inż. arch. Agata Gawlak, prof. PP, dziekan Wydziału Architektury Politechniki Poznańskiej, oraz prof. dr hab. inż. arch. Piotr Marciniak, WA Politechnika Poznańska – „Dostępność

budynków z wielkiej płyty a starzenie się społeczeństwa – szanse i zagrożenia”;

dr hab. inż. Janusz Krentowski, prof. PB, mgr inż. Jakub Ej-dys, WBiNoŚ Politechnika Białostocka – „Rozbiórka jako laboratorium w skali rzeczywistej – wnioski dla diagnostyki i oceny trwałości konstrukcji wielkopłytkowych”;

Zbigniew Pelczar, Schindler Polska, kierownik ds. kluczowych klientów – „Nowy poziom dostępności z Schindler Polska – w jaki sposób windy podnoszą komfort i likwidują bariery architektoniczne w budynkach z wielkiej płyty”.

Podczas sesji ogłoszono także wyniki konkursu „Nowoczesne technologie w budownictwie” i zaprezentowano prace zwycięzców. W skład sądu konkursowego weszli: prof. dr hab. inż. Wiesław Buczkowski, dr hab. inż. Barbara

Ksist, prof. PP i dr hab. inż. Anna Szymczak Graczyk, prof. UP. Wśród nagrodzonych znaleźli się: Damian Mrówczyński z PP i UPP, Alireza Tabrizikahou z PP oraz Daniel Liszowski z PŚI. Konferencję zakończył panel dyskusyjny, w którym uczestnicy podsumowali zdobyte informacje i wspólnie zastanawiali się nad kierunkami przyszłej modernizacji budynków wielkopłytkowych. Panel poprowadzili dr hab. inż. arch. Agata Gawlak, prof. PP (WA PP) oraz dr inż. Marcin Kanoniczak (WILiT PP), a udział wzięli: mgr inż. Andrzej Goroński, Młodzieżowa Spółdzielnia Mieszkaniowa „Enklawa” z Poznania, prof. dr hab. inż. Józef Jasiczak, WILiT Politechnika Poznańska, mgr inż. Paweł Łukaszewski, PINB dla Miasta Poznania, prof. dr hab. inż. arch. Piotr Marciniak, WA Politechnika Poznańska, dr inż. Jarosław Szulc, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, Paweł Piechowiak, POZ BRUK Sp. z o. o. Sp. j. Panel pozwolił uczestnikom na wymianę doświadczeń, analizę wyzwań związanych z modernizacją i rewitalizacją osiedli oraz wskazał możliwości współpracy międzybranżowej. Szczególne podziękowania kierujemy do prelegentów i panelistów, których inspirujące wystąpienia wzbogaciły debatę, oraz do wszystkich uczestników.

Dzięki temu udało się nie tylko podsumować wyzwania i szanse modernizacji budynków wielkopłytkowych, ale także wypracować wspólne wnioski i inspiracje na przyszłość.

**dr inż. Marlena Kucz, prof. PP,  
dr inż. Marcin Kanoniczak**



Na zdjęciu: Ciepłownia biomasowa w Ełku



CZAS NA ENERGETYKĘ



[www.unibep.pl](http://www.unibep.pl)



# OGÓLNOPOLSKIE WARSZTATY PRACY PROJEKTANTA KONSTRUKCJI



WPPK



## Wiśla 23-26 czerwca 2026

POLSKI ZWIĄZEK INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW BUDOWNICTWA  
Oddział Małopolski w Krakowie

przy współpracy Oddziałów: w Bielsku Białej, Gliwicach i Katowicach  
zaprasza

### PROJEKTANTÓW I WYKONAWCÓW

do Kompleksu Hotelowego „Stok” w Wiśle

### NAPRAWY I WZMOCNIENIA KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH

## GEOTECHNIKA

## Największe w kraju specjalistyczne szkolenie zawodowe w branży budowlanej

### tematyka:

- Eurokody drugiej generacji i krajowe załączniki
- Badania gruntu pod kątem planowanej inwestycji
- Przegląd i perspektywy sztucznych sieci neuronowych
- Nasypy drogowe i kolejowe
- Głębokie wykopy w zabudowie miejskiej
- Geotechnika w rejonach szkód górniczych
- Wyzwania związane z fliszem karpackim
- Oddziaływanie tuneli TBM na zabudowę miejską i działania zapobiegawcze
- Monitoring w geotechnice
- Zabezpieczenia przeciwpowodziowe
- Przykłady skomplikowanych projektów geotechnicznych
- Kontrola wykonania robót geotechnicznych
- Budowle ochronne

### terminy

- do 30 kwietnia 2026 roku – ostateczny termin przyjmowania zgłoszeń uczestnictwa i opłat
- do 5 czerwca 2026 roku – potwierdzenie przyjęcia opłaty i przestanie szczegółowych informacji organizacyjnych

### kontakt

Polski Związek Inżynierów  
i Techników Budownictwa  
Oddział Małopolski w Krakowie  
WPPK 2026

31-113 Kraków, ul. Straszewskiego 28  
tel. +48 519 197 983, 502 309 033  
wppk26@pzitb.org.pl  
www.wppk.pzitb.org.pl

konto do wpłat WPPK 32 1160 2202 0000 0001 5495 9571

### Patronat

**Bogusław Rudziński**  
Przewodniczący Zarządu Oddziału PZITB w Bielsku-Białej

**Adam Chromik**  
Przewodniczący Zarządu Oddziału PZITB w Gliwicach

**Kazimierz Konieczny**  
Przewodniczący Zarządu Oddziału PZITB w Katowicach

**Filip Pachla**  
Przewodniczący Zarządu Oddziału Małopolskiego PZITB  
w Krakowie

### Komitet organizacyjny

**Mirosław Boryczko**  
Przewodniczący komitetu

**Prof. dr hab. inż. Michał Topolnicki**  
Koordynator merytoryczny programu

### Patron branżowy



POLSKA IZBA INŻYNIERÓW BUDOWNICTWA – RADA KRAJOWA  
MAŁOPOLSKA OKRĘGOWA IZBA INŻYNIERÓW BUDOWNICTWA  
ŚLĄSKA OKRĘGOWA IZBA INŻYNIERÓW BUDOWNICTWA

### Sponsorzy WPPK 2026



### Patroni medialni

PRZEGLĄD  
**budowlany**

INŻYNIERIA i  
BUDOWNICTWO

wydawnictwo  
INŻYNIERIA

MATERIAŁY  
BUDOWLANE

Inżynier  
budownictwa

Nowoczesne  
Budownictwo  
Inżynierskie

# Jubileusz 70-lecia Instytutu Badawczego Dróg i Mostów

8 września 2025 roku w siedzibie Instytutu Badawczego Dróg i Mostów odbyła się uroczystość 70-lecia działalności IBDiM – instytutu od dekad zaangażowanego w rozwój nowoczesnej i bezpiecznej infrastruktury drogowej i mostowej w Polsce.



Jeszcze przed rozpoczęciem oficjalnych obchodów jubileuszu, w godzinach porannych odbyło się uroczyste posiedzenie Rady Naukowej Instytutu Badawczego Dróg i Mostów oraz Sekcji Inżynierii Komunikacyjnej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Spotkanie to miało charakter refleksyjny i merytoryczny – stanowiło okazję do podsumowania dorobku naukowego instytutu oraz wskazania najważniejszych wyzwań badawczych i planów stojących przed IBDiM. W uroczystości Jubileuszu 70-lecia IBDiM udział wzięli wyjątkowi goście, w tym minister infrastruktury Dariusz Klimczak oraz wiceminister nauki i szkolnictwa wyższego Maria Mrówczyńska, którzy podkreślili kluczową rolę instytutu w tworzeniu trwałych, bezpiecznych i zrównoważonych rozwiązań infrastrukturalnych.

Dyrektor IBDiM, dr hab. inż. Janusz Bohatkiewicz, prof. IBDiM przypomniał, że instytut – którego początki sięgają 1955 roku – przez dziesięciolecia kształtował rozwiązania, które wpłynęły na to, jak dziś funkcjonuje polska sieć drogowa. Zaznaczył również, że potrzeby kraju, wiedza, pasja, determinacja tworzą nasze dzieła, które trwają przez lata, a często przez wieki, dziękując tym samym pracownikom, partnerom naukowym, instytucjom oraz wszystkim zaangażowanym we współpracę. Dziś instytut jako

jednostka nadzorowana przez Ministerstwo Infrastruktury dąży do uzyskania statusu Państwowego Instytutu Badawczego, co ma umocnić jego pozycję jako strategicznego partnera dla administracji rządowej, samorządów, uczelni i sektora prywatnego.

Podczas panelu „Nauka dla Społeczeństwa – Społeczeństwo dla Nauki”, prowadzonego przez dr. hab. inż. Janusza Bohatkiewicza, prof. IBDiM, w którym udział wzięli: prof. dr hab. inż. Leszek Rafalski, prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska, gen. dyw. Marek Wawrzyniak, prof. dr hab. inż. Marcin Ślęzak, prof. dr hab. inż. Maria Mrówczyńska, dr hab. inż. Karol Kowalski, prof. PW, pojawiły się odniesienia do wyzwań przyszłości, potrzeby rozwoju infrastruktury, zarówno cywilnej jak i obronnej, jak również do cyfryzacji infrastruktury.

W czasie uroczystości odbyło się również wystąpienie dr. hab. inż. Marka Mistewicza, prof. emerytowanego IBDiM, zatytułowane „Twórcy Instytutu Budownictwa Drogowego – Protoplasty Instytutu Badawczego Dróg i Mostów”.

W swoim referacie prof. Marek Mistewicz przypomniał o korzeniach IBDiM, kiedy to w 1955 roku powołano Instytut Budownictwa Drogowego – bezpośredniego poprzednika dzisiejszego IBDiM. Jego prezentacja była hołdem dla pionierów polskiej nauki drogowej oraz wkładu wielu pokoleń badaczy w rozwój infrastruktury w Polsce.

W trakcie jubileuszowej uroczystości odbyła się także ceremonia wręczenia odznaczeń dla osób szczególnie zasłużonych dla rozwoju infrastruktury drogowej oraz działalności instytutu. Odznaczenia wręczyli minister infrastruktury Dariusz Klimczak i dyrektor Janusz Bohatkiewicz.

Na zakończenie pragniemy serdecznie podziękować wszystkim Gościom, Pracownikom, Partnerom i Przyjaciołom instytutu za obecność i wspólne świętowanie tak ważnego jubileuszu.

[www.ibdim.edu.pl](http://www.ibdim.edu.pl)



**XVII KONFERENCJA SKB 2026**  
Stowarzyszenie Kosztorysantów Budowlanych

**Miejsca bezpiecznego schronienia**  
Aspekty ekonomiczne, techniczne i prawne

**11-12.06.2026**  
Hotel Lord, Warszawa



# Forum Kobiet 2026 – inspiracja i praktyczna wiedza dla przyszłych inżynierek

W marcu 2026 r. odbyła się kolejna edycja Forum Kobiet – ogólnopolskiej inicjatywy skierowanej przede wszystkim do studentek kierunków technicznych oraz młodych inżynierek rozpoczynających swoją karierę zawodową. Wydarzenie zostało zorganizowane przez Fundację Wspierania Budownictwa Zrównoważonego, reprezentowaną przez Katarzynę Nowak-Dzieszko i Katarzynę Nowak, oraz Polską Izbę Inżynierów Budownictwa, reprezentowaną przez Izabelę Tylek.

Tegoroczna edycja miała charakter ogólnopolski i odbyła się w czterech ośrodkach akademickich: Krakowie, Rzeszowie, Wrocławiu oraz Zielonej Górze. Łącznie w wydarzeniach uczestniczyło ponad 300 osób, a w panelach udział wzięło 45 ekspertek reprezentujących środowisko naukowe, biznes, administrację publiczną oraz organizacje branżowe. Różnorodność reprezentowanych środowisk pozwoliła uczestniczkom spojrzeć na sektor budownictwa z wielu perspektyw i lepiej zrozumieć dostępne ścieżki rozwoju zawodowego.

Trzon programu stanowiły dwa panele dyskusyjne: „Kobiety sukcesu” oraz „Budowanie marki osobistej”. Pierwszy miał charakter inspiracyjny – zaproszone prelegentki dzieliły się doświadczeniami zawodowymi, opowiadając o swojej ścieżce kariery, wyzwaniach oraz sposobach budowania pewności siebie w branży technicznej. Drugi panel koncentrował się na aspektach praktycznych, takich jak przygotowanie do procesów rekrutacyjnych, świadome kształtowanie ścieżki zawodowej, budowanie profesjonalnego wizerunku oraz rozwijanie kompetencji cenionych na rynku pracy. W trakcie spotkań wielokrotnie podkreślano, że kompetencje nie mają płci, a rozwój zawodowy jest procesem, w którym istotną rolę odgrywają zaangażowanie, otwartość na naukę i gotowość do podejmowania nowych wyzwań. Zwracano również uwagę, że porażki stanowią naturalny element kariery i mogą być cennym źródłem doświadczenia, a wybór ścieżki zawodowej powinien być zgodny z własnymi wartościami i predyspozycjami.

Podczas edycji krakowskiej i wrocławskiej podsumowano także kilkumiesięczny cykl warsztatowy dla studentek „Inżynierki przy kawie”, którego celem było wsparcie młodych kobiet w rozwijaniu kompetencji miękkich i przygotowaniu do wejścia na rynek pracy. Ambasadorem tej inicjatywy była firma Vinci Construction.

Nowością tegorocznej edycji był speed consulting, zrealizowany w Krakowie. Były to krótkie, indywidualne konsultacje z przedstawicielami firm, rekruterami oraz prawnikiem.

Uczestniczki miały możliwość omówienia swojego CV, poznania oczekiwań pracodawców oraz uzyskania praktycznych wskazówek dotyczących pierwszych kroków zawodowych. Forma ta spotkała się z dużym zainteresowaniem i została bardzo wysoko oceniona przez uczestniczki.

Forum Kobiet stanowi przykład efektywnej współpracy środowiska akademickiego, biznesu oraz organizacji branżowych. Patronat wiodący nad wydarzeniem objęła firma Vinci Construction, a partnerami strategicznymi były firmy Atlas Ward i Budimex. Wydarzenie wsparły również m.in. Gülermak, Jacobs, Randstad, Fundacja F2F, PLGBC, MdV oraz Fundacja Kobiety Nauki.

Wydarzenie zostało objęte szerokimi patronatami honorowymi przedstawicieli władz uczelni, administracji publicznej oraz organizacji zawodowych, co podkreśla jego ogólnopolski charakter i znaczenie dla środowiska inżynierskiego. Wśród patronów znaleźli się m.in. rektorzy i dziekani uczelni technicznych, okręgowe izby inżynierów budownictwa oraz Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa.

W poszczególnych miastach forum wspierały również władze regionalne i samorządowe, w tym przedstawiciele administracji rządowej oraz parlamentarnej. Tak szerokie grono patronów potwierdza, że inicjatywa odpowiada na realne potrzeby rynku oraz stanowi istotny element dialogu między środowiskiem akademickim a branżą budowlaną. Forum Kobiet pokazuje, jak ważne jest tworzenie przestrzeni do bezpośredniej wymiany doświadczeń oraz budowania relacji między młodym pokoleniem a przedstawicielami branży. Spotkania tego typu nie tylko inspirują, ale także wspierają świadome planowanie kariery i wzmacniają kompetencje przyszłych inżynierów.

**Katarzyna Nowak**



# Nowa Ja, budownictwo, które działa mądrzej

6 marca 2026 roku w Warszawie odbyła się trzecia edycja konferencji dla kobiet w budownictwie Nowa Ja. Choć wydarzenie skierowane jest głównie do kobiet, to przyciągnęło również kilku mężczyzn.

Najważniejsza jednak była tematyka promująca nowoczesne podejście do pracy w sektorze budowlanym. Główna organizatorka i pomysłodawczyni wydarzenia Anna Żmuda postawiła w tym roku na zagadnienia związane właśnie z obszarem „pracy mądrzej, nie ciężkiej”. Program podzielono na cztery bloki: Dobrostan i zdrowie, Relacje, Technologie oraz Efektywność.



Anna Żmuda – organizatorka i pomysłodawczyni konferencji

## Fundament transformacji: dobrostan

Ważnym wątkiem, od którego rozpoczęto konferencję, był dobrostan psychiczny. Joanna Lange postawiła tezę, że to zdrowie jednostki jest fundamentem transformacji jutra. Wskazała na techniki radzenia sobie ze stresem, które pozwolą uniknąć w konsekwencji wypalenia zawodowego. Wtórowała jej w tym Anna Małecka z firmy Budimex, która podkreślała znaczenie budowania silnej sieci wsparcia z korzyścią dla organizacji. Na zakończenie tego panelu w rozmowie prowadzonej przez Anitę Kubanek ekspertki: Weronika Krystoń, Joanna Gutowska, Anna Kuś, Agnieszka Klepacka oraz Justyna Żabka dyskutowały o higienie cyfrowej jako kluczowym elemencie współczesnej produktywności.

## Architektura relacji i model DISC

Od świadomego kształtowania stylów komunikacji zaczęła Monika Jastrzęb. Panelistka, będąca pasjonatką modelu DISC, wyjaśniła to narzędzie jako pomocne w zwiększaniu produktywności. Zrozumienie stylu rozmówcy pozwala szybciej dobrać język, tempo i poziom szczegółowości komunikatu, co ogranicza nieporozumienia. Następnie Magdalena Oskiera (Immergas Polska) przedstawiła temat złożoności relacji w kontekście wielopokoleniowej organizacji. Tę część konferencji zakończył panel dyskusyjny z udziałem Joanny Doruch, Doroty Pieprzki, Karoliny Przybyłek, Anety Andruszkiewicz oraz Magdaleny Oskier, moderowany przez Annę Białkowską. Najmocniej w trakcie rozmowy wybrzmiewało pytanie: „Po co?” postawione przez Karolinę

Przybyłek (Head of BIM w firmie Porr S.A). To proste pytanie ma być receptą na tak zwaną „spotkanoizę”, którą uczestniczki wskazały jako czynnik drastycznie zmniejszający efektywność.

## Technologia jako „kumpel”

Ekspertki bloku technologicznego przybliżyły narzędzia i zasady bezpiecznego ich użytkowania. Katarzyna Barcz zapewniała, że automatyzacja może być „kumpel” – pomocnikiem, który podniesie efektywność procesów. Jakich procesów? Przede wszystkim powtarzalnych, wykonywanych regularnie i opartych na prostych regułach. Zautomatyzowanie ich powinno przynieść nam oszczędność czasu. Z kolei Lena Skrzypczak w duecie z Ewą Ginińską omówiły rolę dostępnych technologii w realizacji inwestycji budowlanych. Nawiązywały w swoim wystąpieniu do popularnej już książki „Atomowe Nawyki” James’a Cleara. Polecały wprowadzanie technologii na plac budowy małymi krokami.

## Efektywność i zarządzanie czasem

Blok dotyczący efektywności rozpoczęła Anna Zawistowska, która poruszyła niezwykle aktualny temat mediacji w budownictwie. Przedstawiła konflikt jako „nowy początek”, moment na odnowienie relacji, jeśli zostanie poprowadzony odpowiednio. Jednak nie byłoby projektów i efektów bez charyzmatycznych osób – taką postacią była zdecydowanie Marzena Maj, która porwała uczestniczki swoją historią i energią, tłumacząc, jak zmieniać marzenia w rzeczywistość i nie zapominać o „dziecku w sobie”. Na zakończenie Agnieszka Nowakowska przypomniała, że czas jest zasobem, którego nie odzyskamy. Przedstawiła narzędzia pozwalające zyskać czas dla siebie, spokój, a co za tym idzie zwiększyć swoją efektywność.

## Podsumowanie: po co?

„Po co organizować konferencję dla kobiet w budownictwie po raz kolejny?”, rekordowa frekwencja trzeciej edycji potwierdza, że kobiety w tym sektorze nie tylko potrzebują przestrzeni do wymiany doświadczeń, ale realnie ją współtworzą. Co istotne, znaczące firmy budowlane na polskim rynku przestały pytać o sens wspierania takich inicjatyw – dziś, widząc realną potrzebę i potencjał, pytają już tylko: „Jak możemy Was wesprzeć?”. Warto w tym miejscu powrócić do idei „pracy mądrzej”. Choć kobiety w budownictwie wciąż mogą wydawać się mniejszością, ich determinacja w rozwijaniu nowoczesnych kompetencji – od technologii BIM po techniki mediacyjne – udowadnia, że to nie liczebność, a jakość podejścia decyduje o sukcesie. Jak pokazała obecność mężczyzn na sali, „Nowa Produktywność” nie ma płci. Ma jednak swoje liderki, które nadają jej tempo i udowadniają, że budownictwo przyszłości działa mądrzej.

**mgr inż. Agata Chorzeпа**

# Nie! Bezpieczna budowa

16 października 2025 r. na terenie Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie odbyło się Seminarium Nie! Bezpieczna budowa, organizowane już od 10 lat przez pracowników Wydziału Geoinżynierii.

Jest to wydarzenie promujące bezpieczne zachowania w budownictwie wśród młodzieży szkół średnich i wyższych. Spotkanie obejmowało dwie części: pierwsza to wystąpienia zaproszonych gości dotyczące problematyki bezpieczeństwa w budownictwie widzianego przez przedstawicieli Państwowej Inspekcji Pracy, Warmińsko-Mazurskiej Izby Inżynierów Budownictwa oraz Wojewódzkiej Komendy Straży Pożarnej. W trakcie wystąpień można się było zapoznać z przyczynami wypadków na budowach, statystykami wypadkowości, tematem roli inżyniera w procesie budowlanym z uwzględnieniem dbałości o bezpieczeństwo robót oraz metodami pomocy ofiarom wypadków. Tematyka wystąpień była krótkim wprowadzeniem w problematykę związaną z konkursem fotograficznym, którego wyniki zostały ogłoszone w drugiej części spotkania.

Konkurs skierowany do uczniów szkół średnich i wyższych odbił się szerokim echem wśród młodzieży, a swoim zasięgiem objął również sąsiednie województwa. W konkursie wzięło udział ponad 50 uczestników. Wśród nich byli uczniowie techników budowlanych i liceów ogólnokształcących z Olsztyna i Mławy oraz studenci Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego i Politechniki Gdańskiej. W trakcie spotkania wszyscy uczestnicy, którzy przystąpili do konkursu, otrzymali certyfikaty uczestnictwa, a organizatorzy wszystkim serdecznie podziękowali za udział w przedsięwzięciu. Kolejnym, chyba najważniejszym punktem spotkania, było ogłoszenie wyników konkursu oraz wręczenie dyplomów i nagród. Fundatorami nagród byli:

- pierwsza nagroda – firma Jurgo,
- druga nagroda – Okręgowy Inspektorat Pracy w Olsztynie,

- trzecia nagroda – Warmińsko-Mazurska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa,
- wyróżnienie – Olsztyński Oddział PZITB oraz Katedra Konstrukcji i Procesów Budowlanych UWM w Olsztynie.

Laureaci w kategorii „szkoły średnie”:

- 1 miejsce – Szymon Naszlin, I LO w Olsztynie,
- 2 miejsce – Dominik Michacz, ZSB w Olsztynie,
- 3 miejsce – Igor Kamiński, ZSB w Olsztynie,
- wyróżnienie – Julia Majewska, ZSB w Olsztynie.



Laureaci w kategorii „szkoły wyższe”:

- 1 miejsce – Julia Błaszkiwicz, Politechnika Gdańska,
- 2 miejsce – Michał Kowalczyk, UWM w Olsztynie,
- 3 miejsce – Aleksander Połonkiewicz, UWM w Olsztynie,
- wyróżnienie – Aleksandra Górniak, Politechnika Gdańska.



Działania związane z promocją bezpiecznych zachowań w budownictwie są realizowane przez pracowników Wydziału Geoinżynierii już od 10 lat. W związku z tym przedstawiciel Okręgowego Inspektoratu Pracy w Olsztynie złożył na ręce dziekana wydziału oraz organizatorów listy gratulacyjne i podziękowania. Podziękowania za wieloletnią współpracę złożył również przedstawiciel firmy Jurgo, która od 10 lat jest zaangażowana w organizację tej imprezy i wspólnie z pracownikami Wydziału Geoinżynierii przyczynia się do promowania bezpiecznych zachowań w budownictwie.

Redakcja „Przeglądu Budowlanego”

# Moderna PORR: partnerstwo dla prefabrykacji i przyszłości budownictwa

Moderna Construction, spółka należąca do Moderna Holding oraz PORR S.A., jedna z największych spółek budowlanych w Polsce, finalizuje połączenie kompetencji w obszarze prefabrykacji betonowej. Nowy podmiot będzie działał pod marką Moderna PORR i skoncentruje się na rozwoju nowoczesnych technologii prefabrykowanych dla budownictwa infrastrukturalnego, mieszkaniowego, przemysłowego i komercyjnego.

PORR S.A. objął 50% udziałów w spółce Moderna Construction posiadającej nowoczesną fabrykę prefabrykatów betonowych w Kartoszynie na Pomorzu. Połączenie doświadczenia całego holdingu Moderny – silnie zakorzenionego w rynku mieszkaniowym premium – z ponad 30-letnim doświadczeniem PORR na polskim rynku generalnego wykonawstwa oznacza powstanie jednego z najbardziej perspektywicznych graczy rynku prefabrykacji w Polsce.

## Strategiczny krok dla Moderny Holding

– Dla Moderny partnerstwo z globalnym liderem budownictwa to przede wszystkim potwierdzenie naszych szerokich kompetencji oraz możliwość ekspansji na nowe segmenty rynku budowlanego i zwiększenie udziału w transformacji infrastrukturalnej Polski. Transakcja ta stanowi naturalny etap rozwoju holdingu, wejścia na nowy poziom działalności operacyjnej i realizację największych inwestycji infrastrukturalnych, energetycznych, kolejowych i przemysłowych w Polsce – mówi Adam Małaczek, prezes Moderna Holding.

– Decyzja o powołaniu spółki Moderna PORR wynika z naszego głębokiego przekonania, że prefabrykacja stanowi przyszłość nowoczesnego budownictwa. Jako generalny wykonawca konsekwentnie rozwijamy naszą działalność w oparciu o innowacyjne, efektywne i zrównoważone rozwiązania, które odpowiadają na wyzwania współczesnego rynku – powiedział Piotr Kledzik, prezes zarządu PORR S.A. – Równie istotnym filarem naszej strategii jest aktywne i długofalowe inwestowanie w Polsce – ze szczególnym naciskiem na rozwój lokalnych społeczności, wzmacnianie krajowego łańcucha dostaw oraz tworzenie stabilnych miejsc pracy. Objęcie 50% udziałów w zakładzie w Kartoszynie było zatem naturalnym i konsekwentnym krokiem. Traktujemy tę inwestycję jako ważny etap szerszego procesu – dodaje Piotr Kledzik.

## Nowy rozdział dla polskiego budownictwa

Powstanie Moderna PORR to odpowiedź na zmieniające się potrzeby rynku: większą skalę inwestycji infrastrukturalnych, presję kosztową, niedobór pracowników oraz rosnące znaczenie jakości i czasu realizacji. Przedstawiciele spółki podkreślają, że prefabrykacja betonowa staje się jednym z najważniejszych trendów całej branży budowlanej – zarówno w Polsce, jak i w Europie. Podstawową zaletą jest możliwość przeniesienia do hal produkcyjnych szeregu prac, które do tej pory były wykonywane na budowie. Ma to duże znaczenie zwłaszcza w surowych warunkach zimowych.

– Ograniczenie wpływu warunków atmosferycznych na proces budowy to mniejsza liczba błędów wykonawczych i większa przewidywalność realizacji. Prefabrykacja ogranicza liczbę robót mokrych i pracochłonnych procesów wykonywanych tradycyjnie



Podpisanie umowy pomiędzy Moderna Construction (Adam Małaczek, prezes zarządu) i PORR S.A. (Piotr Kledzik, prezes zarządu) © PORR

na miejscu. Prefabrykacja to także zrównoważony rozwój – mamy tutaj mniejsze straty materiałowe, zoptymalizowaną logistykę, możliwość recyklingu materiałów i ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> związanych z budową – mówi Adam Małaczek.

Prefabrykaty betonowe są wykorzystywane w niemal wszystkich kluczowych sektorach gospodarki. Najszerze zastosowanie znajdują w budownictwie komercyjnym, przemysłowym i mieszkaniowym. W infrastrukturze transportowej stosuje się je przy budowie dróg, autostrad, mostów, tuneli, parkingów, lotnisk oraz linii kolejowych. Istotną rolę odgrywają również w budownictwie hydrotechnicznym i morskim – przy realizacji portów, nabrzeży, falochronów.

– Prefabrykacja to synonim szybkiego i precyzyjnego budowania – pozwala znacząco skrócić czas realizacji inwestycji, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości i powtarzalności wykonania. Rozwijamy własne, zaawansowane technologie, takie jak system SlabTrack, który również opiera się na prefabrykowanych elementach. To podejście pozwala nam nie tylko zwiększać efektywność realizacji projektów, ale także wyznaczać nowe standardy w nowoczesnym budownictwie infrastrukturalnym – powiedział Tomasz Rakowski, członek zarządu PORR S.A., odpowiedzialny za Pion Kubatury i Innowacji.

## Rozbudowa zakładu i nowe inwestycje

Władze spółki Moderna PORR zapowiadają intensywny rozwój zakładu produkcyjnego w Kartoszynie. W planach jest m.in. zakup dodatkowego węzła betoniarzkiego, rozbudowa hal produkcyjnych, inwestycje w park maszynowy i logistyczny, zakup nowoczesnych środków transportu wewnętrznego, budowa zaplecza socjalno-administracyjnego oraz rozwój projektowania cyfrowego. Celem jest stworzenie zakładu zdolnego obsługiwać zarówno potrzeby wewnętrzne w ramach grupy, jak i klientów zewnętrznych – innych generalnych wykonawców, deweloperów oraz inwestorów publicznych.

**PORR Newsroom**

# Jubileusz 80 Lat Kształcenia na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

W roku 2026 Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie obchodzi jubileusz 80 lat działalności dydaktycznej i naukowej. Wydarzenie to wpisuje się w obchody 210 lecia SGGW i stanowi ważny element refleksji nad rozwojem nauk inżynierskich w Polsce.

Uroczystości jubileuszowe odbędą się 3 lipca 2026 roku na kampusie SGGW w Warszawie. Jubileusz jest skierowany do szerokiego grona odbiorców. W szczególności do pracowników naukowych, przedstawicieli środowiska inżynierskiego, administracji publicznej, studentów oraz absolwentów Wydziału. Wydarzenie ma charakter otwarty dla wszystkich osób zainteresowanych problematyką budownictwa, inżynierii środowiska oraz zrównoważonego rozwoju.

Celem jubileuszu jest podsumowanie dorobku Wydziału, który od 1946 roku rozwija się od tradycyjnej melioracji wodnej do nowoczesnej, interdyscyplinarnej inżynierii środowiska, budownictwa i architektury. Wydział pełni istotną rolę w kształceniu kadr technicznych oraz prowadzeniu badań naukowych odpowiadających na potrzeby współczesnej gospodarki i wyzwań cywilizacyjnych. Do roku 2026 Wydział wykształcił ponad 15 tysięcy absolwentów oraz znaczącą liczbę doktorów i doktorów habilitowanych, co potwierdza jego wysoką pozycję akademicką.

Program wydarzenia obejmuje część oficjalną, wystąpienia władz uczelni oraz Dziekana Wydziału, a także dwa panele dyskusyjne. Tematyka paneli koncentruje się na aktualnych i przyszłych kierunkach rozwoju inżynierii środowiska, budownictwa i architektury, jak również na roli nauki i dydaktyki w kształtowaniu nowoczesnych kompetencji inżynierskich. W wydarzeniu wezmą udział przedstawiciele środowiska

naukowego, praktycy oraz absolwenci, co umożliwi wymianę doświadczeń i integrację środowiska.

Jubileusz stanowi nie tylko okazję do podsumowania historii i osiągnięć, lecz także do budowania dalszej współpracy między nauką a praktyką. Szczególne znaczenie ma obecność absolwentów i partnerów Wydziału, ponieważ rozwój tej jednostki był i pozostaje efektem ciągłości pokoleń oraz wspólnego zaangażowania.

Serdecznie zapraszamy wszystkich zainteresowanych do udziału w uroczystościach jubileuszowych oraz wspólnego świętowania 80 lat kształcenia na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW.

Szczegółowy program obchodów jest dostępny na stronie internetowej: <https://wbis.sggw.edu.pl/80-lat-wbis/>.

Serdecznie zapraszamy

**Dziekan Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska**  
**prof. dr hab. inż. Grzegorz Majewski**

**Dyrektor Instytutu Inżynierii Lądowej**  
**prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda**

**Dyrektor Instytutu Inżynierii Środowiska**  
**prof. dr hab. inż. Janusz Kubrak**





Politechnika  
Wroclawska



# XV KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA **BUDOWNICTWO W ENERGETYCE**

13–16 października 2026 r., Karpacz

[www.konferencja-budownictwo-w-energetyce.pl](http://www.konferencja-budownictwo-w-energetyce.pl)

[www.stow-staszica.org](http://www.stow-staszica.org)



[wacetob.com.pl](http://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
- Audyt kosztowy przedsięwzięć budowlanych

## **SZACOWANIE WARTOŚCI**

- nieruchomości, nakładów inwestycyjnych

Warszawskie Centrum Postępu Techniczno-Organizacyjnego  
Budownictwa WACETOB Sp. z o.o.  
00-641 Warszawa, ul. Mokołowska 4/6 lok. 208  
Tel. 22 622 13 46, 799 041 080, e-mail: [wacetob@wacetob.com.pl](mailto:wacetob@wacetob.com.pl)



# Stan cieplno-wilgotnościowy osadzenia okien i drzwi w murach

## Thermal and humidity condition of window and door placement in walls

mgr inż. Jerzy Bogdan Zembrowski (ORCID: 0009-0000-9329-6792),  
Biuro Doradztwa Budowlanego, Białystok

**Streszczenie:** Idąc w ślad za występującymi negatywnymi zjawiskami w strefie osadzenia okien i drzwi w murach, przeanalizowano zjawisko przepływu ciepła oraz dyfuzji pary wodnej w tej strefie, symulując pełne warunki rzeczywiste. Wskazano na istnienie zmiennych liniowych mostków termicznych oraz zmiennych w czasie mostków dyfuzji pary wodnej wokół ram okien i drzwi. Grożą one powstaniem nadmiernej kondensacji pary wodnej w szczelinach między ramą okien i drzwi a murem – prowadzącej do pleśni i zagrzybienia. Wskazano na pilną potrzebę weryfikacji dotąd stosowanej metodyki projektowania i obsadzania okien i drzwi w murach.

**Słowa kluczowe:** okna i drzwi, montaż okien i drzwi, wymiana ciepła, dyfuzja pary wodnej.

**Abstract:** Following the negative phenomena occurring in the window and door placement zones in walls, heat transfer and water vapor diffusion in this zone were analyzed by simulating full real-world conditions. The existence of variable linear thermal bridges and time-varying water vapor diffusion bridges around window and door frames was identified. These pose a risk of excessive water vapor condensation in the gaps between the window and door frames and the wall, leading to mold and mildew. An urgent need was identified to verify the methodology used so far for designing and installing windows and doors in walls.

**Keywords:** windows and doors, window and door installation, heat exchange, water vapor diffusion.

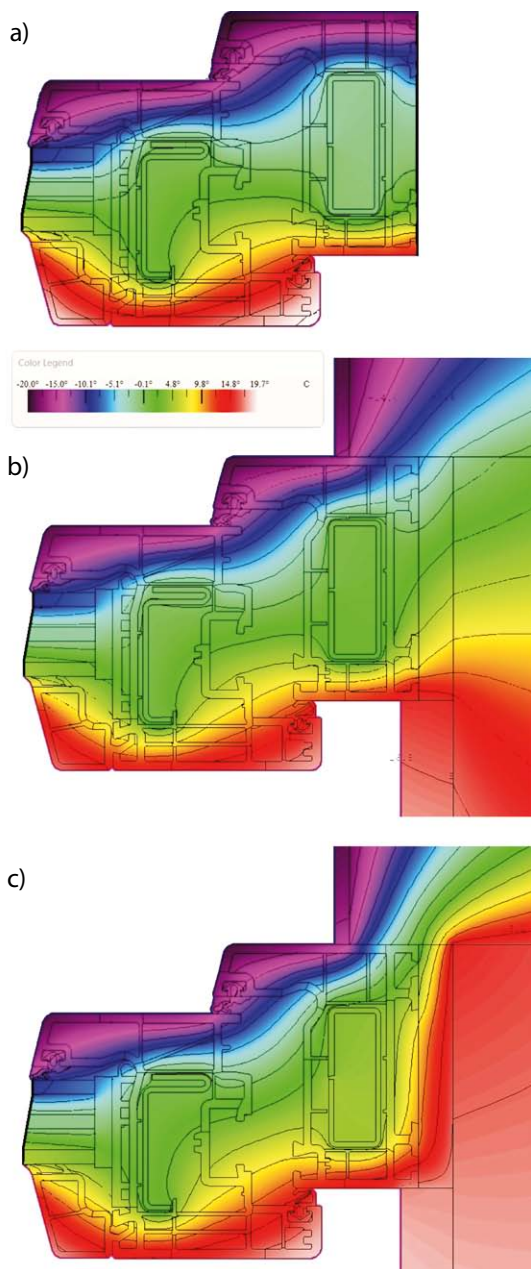
## 1. Wprowadzenie

Liczne obserwacje eksploatacji różnych typów budynków – głównie mieszkalnych jedno- i wielorodzinnych, a także użyteczności publicznej ujawniają nieprawidłowości i wady w strefie osadzenia okien i drzwi w murach. Najczęstszymi mankamentami są glony, pleśń i wykwity, a nawet zagrzybienia zlokalizowane w pachwinach po obwodzie styku ram stolarki z ościeżami. Występują one zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz pomieszczeń. Szczególnie groźne są te drugie, bo zarodniki grzybów pleśniowych są kancerogenne i alergenogenne, a skomasowane we wnętrzach wywołują u ludzi groźne choroby zagrażające zdrowiu i życiu [1]. Nie bez znaczenia jest też korozja biologiczna elementów budynków i jej szpecące skutki. Takie nieprawidłowości w ościeżach ram okien przedstawia rysunek 1. Siedem lat temu postanowiłem przyjrzeć się bliżej

zjawiskom zachodzącym w strefie osadzenia stolarki, by poznać przyczyny opisanych negatywnych zjawisk – zwłaszcza że zostały one stwierdzone na terenie całej Polski. Liczne odkrytki miejsc noszących ślady pleśni w ościeżach wywołały zaskoczenie, bowiem tylko w sporadycznych przypadkach brakowało wypełnienia termoizolacyjnego w szczelinach między ramą a ościeżem. W zdecydowanej większości przypadków wypełnienie stanowiły materiały termoizolacyjne. Co ciekawe, mimo iż odkryta szczelina była wypełniona w jednakowy sposób na całym obwodzie stolarki, to pleśń i zwiększona wilgotność wypełnienia występowała tylko na pewnych odcinkach, a nie na całym obwodzie ramy.



**Rys. 1.** Przykłady pleśni i wykwitów z życia wzięte



**Rys. 2.** Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym pionowej ramy okna o współczynniku przenikania ciepła  $U_f = 1,23 \text{ W/m}^2\text{K}$  (a), rozkład temperatur tej samej ramy wraz ze strefą osadzenia w murze z bloczków betonu komórkowego gęstości  $400 \text{ kg/m}^3$  ocieplonych styropianem EPS-80 grubości 15 cm i tynkiem wewnętrznym cementowo-wapiennym (b), rozkład temperatur w przekroju tej samej ramy osadzonej w żelbecie gęstości  $2000 \text{ kg/m}^3$  z takim samym ociepleniem i tynkiem (c)

## 2. Liniowe mostki ciepłe

Pomiary wilgotności materiału wypełniającego szczeliny w miejscach pleśni i zagrzybienia wykazały ogromny zakres stopnia zawilgocenia. Przegląd publikacji oraz raportów z badań na całym świecie wykazał, że wszędzie analizowano tylko zagadnienia przepływu ciepła w strefie osadzenia stolarki lub przez samą ramę – celem określenia liniowych

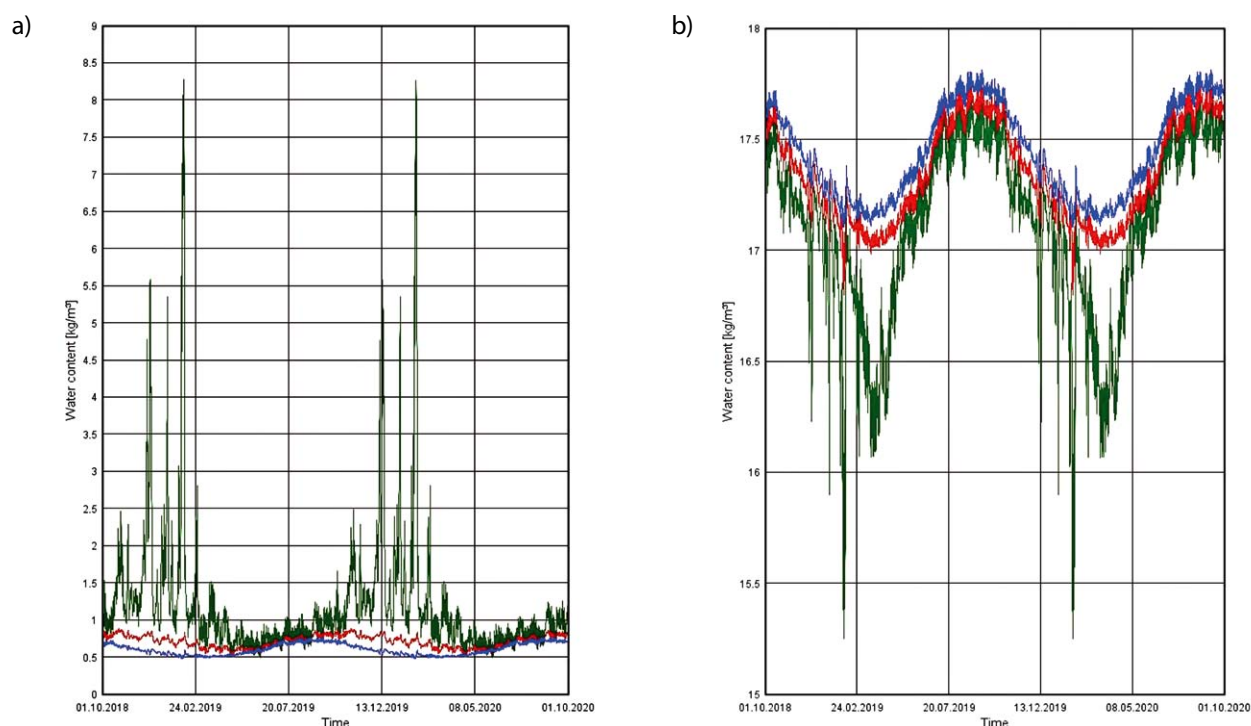
mostków cieplnych  $\Psi$  oraz współczynników przenikania ciepła  $U_f$  ram. Brak jest natomiast analiz uwzględniających dyfuzję pary wodnej w strefie osadzenia stolarki. Strefa ta jest charakterystyczna, bo na obwodzie stolarki występuje skomplikowana geometria liniowych mostków cieplnych – potęgowana różnym rodzajem i konstrukcją ram, różnym sposobem ich osadzenia (w licu muru, cofnięte, wysunięte), różną szerokością szczelin między ramą a ościeżem, różnym materiałem wypełniającym te szczeliny, różnymi parapetami wewnętrznymi i zewnętrznymi, różnymi nadprożami, jak też różnymi materiałami murów i różnym ich ociepleniem. Już na pierwszym etapie analiz charakterystyka przepływu ciepła w strefie osadzenia wykazała, iż rozkład temperatur w przekroju poprzecznym ram mocno się różni od rozkładów prezentowanych przez poszczególnych producentów. Analizy ciepło-wilgotnościowe wykazują bowiem, że rozkład temperatur w przekroju ram jest deformowany przez wymianę ciepła i wilgoci w murze w strefie odległej do ok. 25 cm od ramy, a także deformowany przez przepływ ciepła przez materiał wypełniający szczelinę między ramą stolarki a ościeżem.

Przykładowy rozkład temperatur w przekroju poprzecznym pionowej ramy uzyskującej współczynnik przenikania ciepła  $U_f = 1,23 \text{ W/m}^2\text{K}$  przedstawia rysunek 2a. Dla porównania, rysunek 2b przedstawia rozkład temperatur uwzględniający strefę osadzenia tej samej ramy w murze z bloczków betonu komórkowego gęstości  $400 \text{ kg/m}^3$  ocieplonych styropianem EPS-80 grubości 15 cm i tynkiem. Rysunek 2c przedstawia jeszcze bardziej różniący się rozkład temperatur w przekroju tej samej ramy, ale osadzonej w murze z żelbetu gęstości  $2000 \text{ kg/m}^3$  z takim samym ociepleniem, tynkiem i wypełnieniem w szczelinie.

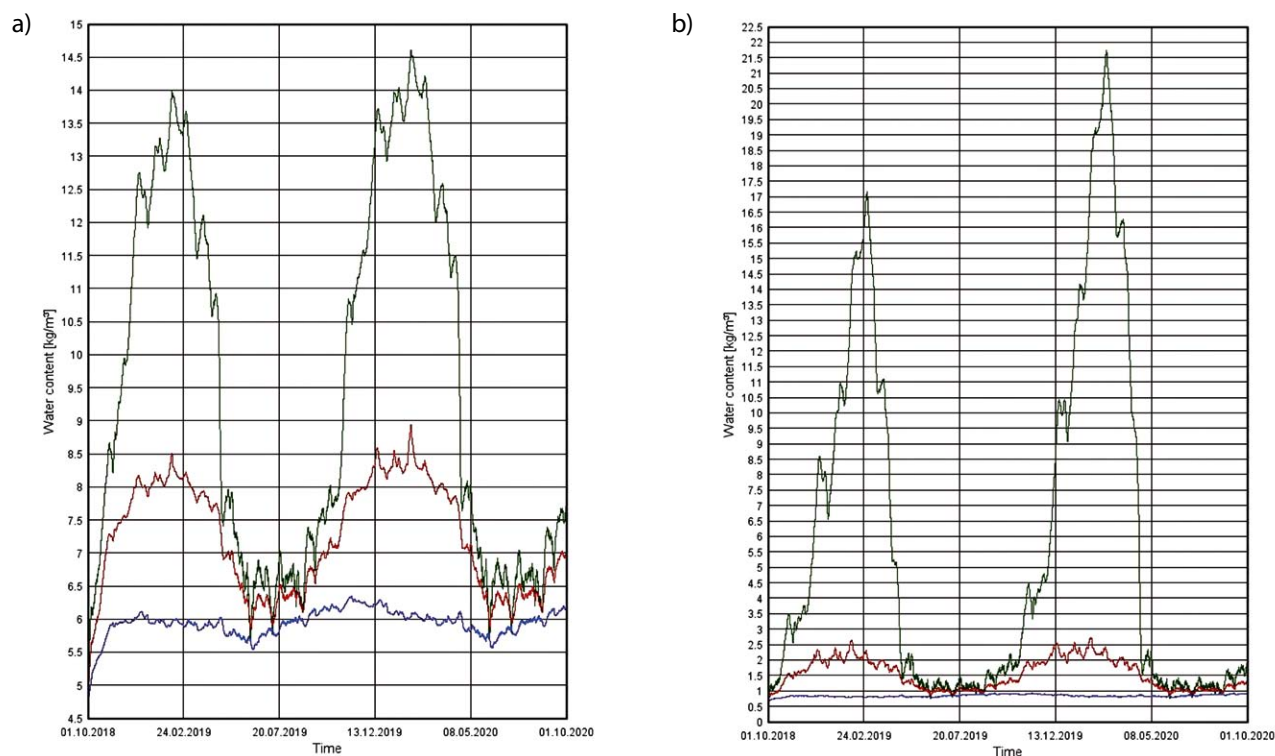
Dla czytelnego zobrazowania przedstawione tu wyniki analizy transportu ciepła dotyczą warunków stacjonarnych z temperaturą zewnętrzną  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  oraz wewnętrzną  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Symulacje przepływu ciepła przeprowadzono z użyciem programu komputerowego THERM [2]. Strumień ciepła przenikającego przez samą ramę w przypadku 2a wynosi  $49,264 \text{ W/m}^2$ , w przypadku 2b wynosi  $44,834 \text{ W/m}^2$ , zaś w przypadku 2c wynosi  $42,097 \text{ W/m}^2$ . Zatem strata ciepła przez ramę w stanie 2b jest mniejsza o 9%, a w stanie 2c mniejsza o 14%. Spadek przepływu ciepła przez ramę jest spowodowany zmianą temperatur w przekroju ramy w pobliżu jej styku z ościeżem – na skutek wymiany ciepła przez szczelinę i sąsiadującą strefą muru. Wyniki obliczeń wskazują, że dobrane moce grzewcze podłóg ogrzewanych czy grzejników są zbyt duże, co niestety zwiększa koszt inwestycyjny.

## 3. Liniowe mostki dyfuzyjne pary wodnej

Skoro w strefie osadzenia ramy występują nierównomierne przepływy ciepła i nierównomierne pola temperatur, to staje się jasne, że w tej strefie muszą być rozpoznane także rzeczywiste przepływy wilgoci – czyli dyfuzja pary wodnej.



**Rys. 3.** Zawartość wilgoci w ciągu 12 miesięcy w szczelinie pomiędzy ramą stolarki w łazience a murem z bloczków silikatowych ocieplonych styropianem EPS-80 grubości 15 cm – wypełnionej pianką PU o współczynniku oporu dyfuzji względem pary wodnej  $\mu = 2$ , kolor niebieski – na styku z pachwiną, kolor czerwony – w środku szczeliny, kolor zielony – w licu muru (a), zawartość wilgoci w ciągu 12 miesięcy w murze z bloczków silikatowych na styku ze szczeliną z rysunku 3a; kolor niebieski – na styku z pachwiną, kolor czerwony – na wysokości środka szczeliny, kolor zielony – w licu muru (b)



**Rys. 4.** Zawartość wilgoci w ciągu 12 miesięcy w szczelinie pomiędzy ramą stolarki w łazience a murem z bloczków betonu komórkowego gęstości 400 kg/m<sup>3</sup> ocieplonych styropianem EPS-80 grubości 15 cm – wypełnionej pianką PU o współczynniku oporu dyfuzji względem pary wodnej  $\mu = 50$ , kolor niebieski – na styku z pachwiną, kolor czerwony – w środku szczeliny, kolor zielony – w licu muru (a), zawartość wilgoci w ciągu 12 miesięcy w murze z bloczków betonu komórkowego gęstości 400 kg/m<sup>3</sup> na styku ze szczeliną z rysunku 4a, kolor niebieski – na styku z pachwiną, kolor czerwony – na wysokości środka szczeliny, kolor zielony – w licu muru (b)

Wniosek ten wynika z faktu, iż ciśnienie cząstkowe pary wodnej w każdym miejscu materiału zawierającego pory otwarte, podczas dyfuzji, jest zależne od jej lokalnej temperatury w porach [3, 4]. Zmiana ciśnienia cząstkowego pary wodnej na skutek sorpcji wilgoci oraz kondensacji pary wodnej bezpośrednio wpływa na zawartość wilgoci w poszczególnych miejscach materiałów. Jak duże są zmiany zawartości wilgoci w materiale wypełniającym szczelinę oraz w materiale muru na styku ze szczeliną, niechaj świadczą charakterystyki pokazane na rysunkach 3 i 4. Rysunek 3a przedstawia przebieg zawartości wilgoci w szczelinie w ciągu 12 miesięcy w łazience w Krakowie, gdy mur wykonano z bloczków silikatowych ocieplonych styropianem EPS-80 grubości 15 cm, a szczelinę wypełniono pianką PU o współczynniku oporu dyfuzji względem pary wodnej  $\mu = 2$ . Rysunek 3b przedstawia zawartość wilgoci w murze na styku z tą szczeliną. Dla porównania przykładowy przebieg zawartości wilgoci w szczelinie w takim samym pomieszczeniu przedstawia rysunek 4a, gdy mur wykonano z bloczków betonu komórkowego gęstości  $400 \text{ kg/m}^3$  ocieplonych takim samym styropianem, ale szczelinę wypełniono pianką PU o współczynniku oporu dyfuzji względem pary wodnej  $\mu = 50$ . Zawartość wilgoci w murze na styku z tą szczeliną przedstawia rysunek 4b. W obu przypadkach symulację przepływu ciepła oraz dyfuzji pary wodnej w warunkach rzeczywistych przeprowadzono z zastosowaniem programu komputerowego WUFI2D [5].

#### 4. Kryteria poprawności rozwiązań obsadzenia stolarki

Analizy cieplno-wilgotnościowe w warunkach rzeczywistych i danej lokalizacji budynku są niezbędne architektom podczas sporządzania projektów technicznych, a także są konieczne monterom stolarki i inwestorom, bowiem są jedyną podstawą do tworzenia rozwiązań optymalnych pod względem kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych na ogrzewanie. Sprawdzenie takie jest też niezbędne w celu wyeliminowania szkodliwej kondensacji pary wodnej – na powierzchni stolarki i ościeży, wewnątrz materiałów w strefie osadzenia i w samej szczelinie między ramą a murem. Pierwszy cel pozwala spełniać wymagania [6] w zakresie tworzenia rozwiązań optymalnych ekonomicznie, zaś drugi cel pozwala spełniać wymagania [7] w zakresie unikania pleśni i korozji biologicznej elementów budynku.

Spełnienie ww. celów wymaga uwzględnienia poniższych kryteriów:

- Najniższa w ciągu roku temperatura w pachwinie między ramą stolarki a tynkiem ościeża oraz najniższa w ciągu roku temperatura na powierzchni ramy stolarki od strony wnętrza – nie mogą być mniejsze niż temperatura punktu rosy  $t_r$  w danych warunkach – dla bezpieczeństwa, powiększona o  $1^\circ\text{C}$ .
- Szerokość szczeliny między ramą i ościeżem, zachodzenie termoizolacji na ramę stolarki, ewentualne wysunię-

cie stolarki poza lico muru oraz opór dyfuzji taśm uszczelniających względem pary wodnej od wewnątrz i od zewnątrz – powinny w każdym czasie eliminować kondensację pary wodnej większą niż dopuszczalna i eliminować kumulację wilgoci w tej strefie w ciągu roku – w samej szczelinie i stykających się z nią materiałach ościeża.

- Zmniejszona wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła  $\Psi$  po obwodzie stolarki w wyniku poniesionego w tym celu kosztu inwestycyjnego, powinna równoważyć zaoszczędzone przez to koszty energii z tytułu zmniejszonych strat ciepła w tej strefie w okresie przynajmniej 10 lat eksploatacji budynku.

Wyniki analiz cieplno-wilgotnościowych dotyczących stanów istniejących doskonale tłumaczą przyczyny wad wspomnianych i pokazanych na fotografiach. Są to:

- zbyt duży lub zbyt mały opór dyfuzji względem pary wodnej materiału wypełniającego szczelinę między ramą, a ościeżem lub niepełne jej wypełnienie;
- zbyt małe zachodzenie termoizolacji na ramę;
- zbyt duży lub zbyt mały opór dyfuzji względem pary wodnej taśm uszczelniających – zarówno od wewnątrz, jak też od zewnątrz;
- niewłaściwe wysunięcie ramy poza lico muru bądź niecelowe jej wysunięcie;
- niewłaściwy montaż parapetu zewnętrznego i wewnętrznego;
- niewłaściwie przygotowane ościeża przed montażem stolarki.

#### 5. Podsumowanie

Analizy cieplno-wilgotnościowe w warunkach rzeczywistych stref obsadzenia stolarki są nowością, bo dotąd nie były stosowane nie tylko w Polsce, ale na całym świecie. Nadal w tych strefach analizuje się jedynie przepływ ciepła, pomijając dyfuzję pary wodnej. W kolejnych artykułach przedstawię szczegółowe wyniki takich analiz, bo są niezwykle frapujące. Opiszę też zasadę i metodologię poprawnego zaprojektowania i montażu stolarki okienno-drzwiowej.

**Rysunki i zdjęcia autora**

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Praca zbiorowa pod red. Jerzego Ważnego i Jerzego Karysia, Ochrona budynków przed korozją biologiczną, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2001
- [2] THERM Finite Element Simulator v. 7.8.77.0 Regents of the University of California USA, 2024
- [3] Pogorzelski J. A., Fizyka cieplna budowli, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1976
- [4] Bogosłowski W. N., Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1985
- [5] WUFI 2D v.4.5.0 Fraunhofer-Institut für Bauphysik Deutschland, 2023
- [6] Rozporządzenie Ministra Rozwoju w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego z dnia 27.03.2024 r.
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 27.03.2024 r.

# Prace na wysokości – pierwszy temat w cyklu o Standardach Bezpieczeństwa Porozumienia dla Bezpieczeństwa w Budownictwie

Bezpieczeństwo zaczyna się od standardów – a standardy zaczynają się od pracy szczególnie niebezpiecznej. Rozpoczynamy cykl artykułów poświęconych popularyzacji Standardów Bezpieczeństwa opracowanych przez Porozumienie dla Bezpieczeństwa w Budownictwie wśród kadry inżynierskiej. W kolejnych publikacjach będziemy przedstawiać poszczególne grupy standardów – ich strukturę, praktyczne zastosowanie oraz najważniejsze wymagania organizacyjne i techniczne.

Nie jest przypadkiem, że zaczynamy od prac na wysokości. To właśnie one należą do najczęściej występujących prac szczególnie niebezpiecznych w budownictwie i jednocześnie do tych, które najczęściej kończą się ciężkimi wypadkami lub trwałym kalectwem. Z tego względu wymagają szczególnego przygotowania, planowania i nadzoru. Jednocześnie jest to obszar, w którym dobrze opracowany standard może wprost przełożyć się na bezpieczeństwo ludzi.

## Czym są Standardy Bezpieczeństwa Porozumienia

Standardy BHP Porozumienia dla Bezpieczeństwa w Budownictwie to zestaw ujednoczonych zasad organizacji pracy opracowany przez największych generalnych wykonawców w Polsce. Powstały jako odpowiedź na potrzebę stworzenia wspólnego podejścia do bezpieczeństwa na budowach – niezależnie od inwestora, lokalizacji czy rodzaju robót.

Ich celem jest poprawa bezpieczeństwa pracy poprzez wdrażanie rozwiązań praktycznych i sprawdzonych technicznych oraz dobrych praktyk wypracowanych w realnych warunkach budowy.

Standardy są dziś: kompendium wiedzy technicznej i organizacyjnej, praktycznym narzędziem dla wszystkich którzy są odpowiedzialni za organizowanie pracy na budowie, w tym: inżynierów i kierowników budów i robót, specjalistów BHP oraz pracodawców, źródłem sprawdzonych rozwiązań z największych inwestycji w Polsce. Zawierają nie tylko wymagania wynikające z przepisów prawa i norm, lecz także konkretne wskazówki, jak te wymagania zrealizować w praktyce. To właśnie ta praktyczność jest ich największą wartością.

## Dlaczego właśnie prace na wysokości

Prace na wysokości są klasycznym przykładem prac szczególnie niebezpiecznych. Ryzyko wypadku jest tu wysokie nie

tylko ze względu na samo miejsce pracy, lecz także na czynniki zewnętrzne takie jak: warunki atmosferyczne, dostęp do stanowiska czy sposób organizacji robót.

Dlatego standardy w tym obszarze nie ograniczają się do jednego dokumentu. Tworzą całą grupę, która obejmuje różne sytuacje techniczne i organizacyjne.

## Grupa standardów: prace na wysokości – system uporządkowanej wiedzy

Jedną z największych zalet systemu standardów jest jego przejrzysta struktura.

Standard „Prace na wysokości” nie jest pojedynczym dokumentem – to grupa standardów, które rozwijają poszczególne tematy i odpowiadają konkretnym technologiom oraz warunkom pracy.

W skład tej grupy wchodzi m.in.:

- 2.1. Roboty na dużych wysokościach,
- 2.2. Rusztowania,
- 2.3. Pomosty robocze,
- 2.4. Drabiny,
- 2.5. Podesty ruchome,
- 2.6. Roboty na dachach.

Każdy z tych standardów opisuje inny scenariusz pracy, inne zagrożenia i inne rozwiązania techniczne. To właśnie dlatego osoba korzystająca ze standardów otrzymuje nie ogólną teorię, lecz konkretną instrukcję działania.

## Jak zbudowany jest standard – struktura, która prowadzi inżyniera krok po kroku

Jedną z cech wyróżniających standardy jest ich powtarzalna, logiczna struktura.

Każdy standard prowadzi użytkownika przez cały proces przygotowania i realizacji robót.

Najczęściej obejmuje on trzy główne poniższe części.

- Wstęp – identyfikacja zagrożeń

Na początku standard wyjaśnia: kiedy dana praca jest uznawana za szczególnie niebezpieczną, jakie zagrożenia występują w danej technologii, jakie są podstawowe zasady bezpieczeństwa.

Na przykład w standardzie dotyczącym prac szczególnie niebezpiecznych wskazano, że większość robót budowlanych wiąże się ze znacznym prawdopodobieństwem zdarzeń wypadkowych i wymaga szczególnego nadzoru oraz przygotowania. To istotna informacja gdyż wskazuje skalę ryzyka i konieczność systemowego podejścia do organizacji pracy.

- Działania przed rozpoczęciem robót – planowanie bezpieczeństwa

Ta część standardu ma charakter operacyjny.

Zawiera konkretne wymagania dotyczące przygotowania robót, m.in.: opracowania Instrukcji Bezpiecznego Wykonywania Robót (IBWR), identyfikacji zagrożeń i sposobów ich eliminacji, doboru odpowiednich urządzeń i technologii, przygotowania zespołu pracowników.

Standard jasno wskazuje, że podstawą rozpoczęcia pracy jest opracowanie IBWR oraz oceny ryzyka dla konkretnego zadania. To jest dokładnie ten moment, w którym standard staje się narzędziem pracy inżyniera.

- Działania podczas prowadzenia robót – organizacja pracy w praktyce

Ta część standardów opisuje: sposób prowadzenia robót, wymagania dotyczące nadzoru, zasady komunikacji, wymagania dotyczące sprzętu i zabezpieczeń.

Na przykład w standardzie dotyczącym prac na dachach podkreślono, że wszystkie roboty muszą być prowadzone pod bezpośrednim nadzorem, a nadzorujący powinien być obecny przez cały czas trwania prac. To są konkretne wskazówki organizacyjne oparte o wymagania przepisów.

## Co zawierają standardy prac na wysokości

Standardy są materiałem technicznym, ale jednocześnie bardzo praktycznym.

Znajdują się w nich m.in.: wymagania wynikające z przepisów prawa, odniesienia do norm technicznych, minimalne wymagania bezpieczeństwa, rozwiązania techniczne, przykłady dobrych praktyk, schematy i ilustracje, listy kontrolne, wskazówki organizacyjne.

Na przykład diagram rusztowania w standardzie pokazuje szczegółową konstrukcję systemową, w tym elementy takie jak stężenia, poręcze czy kotwy, co pozwala zrozumieć wymagania dotyczące stabilności konstrukcji i jej obciążeń. (diagram na stronie 3 standardu rusztowań).

To wiedza, którą można wykorzystać bezpośrednio na budowie.

## Sposób wykorzystania standardów

Standardy nie są dokumentem „do szuflady”. To narzędzie, które można wykorzystać praktycznie na każdym etapie realizacji inwestycji.

- Planowanie robót: dobór technologii, wybór środków dostępu, planowanie zabezpieczeń, określenie kolejności prac. Na przykład standard dotyczący pomostów roboczych wskazuje, że dobór odpowiedniego typu pomostu powinien nastąpić już na etapie planowania technologii robót.

- Przygotowanie budowy: opracowanie IBWR, przygotowanie planu BIOZ, szkolenia pracowników, organizacja stanowisk pracy.

- Prowadzenie robót: nadzór nad pracami, kontrola sprzętu, organizacja pracy zespołów, reagowanie na zmiany warunków. Na przykład standard dotyczący podestów ruchomych wymaga zapewnienia pełnej dokumentacji urządzenia oraz sprawdzenia jego stanu technicznego przed rozpoczęciem pracy.

- Szkolenia i rozwój kadry. Standardy są doskonałym materiałem szkoleniowym, ponieważ: opisują rzeczywiste sytuacje techniczne, zawierają konkretne wymagania, pokazują dobre praktyki, są zrozumiałe dla pracowników.

Największą wartość standardów to wiedza z budów, nie z podręczników. Standardy zostały opracowane przez praktyków. To efekt doświadczeń firm realizujących największe inwestycje budowlane w Polsce.

Dlatego zawierają: rozwiązania sprawdzone w praktyce, organizację pracy w rzeczywistych warunkach, technologie stosowane na dużych budowach, sposoby eliminacji zagrożeń. Są więc w istocie skondensowaną wiedzą, której inżynier musiałby szukać w wielu źródłach: przepisach, normach, instrukcjach producentów, doświadczeniu innych budów. Standardy zbierają to wszystko w jednym miejscu.

Ten artykuł otwiera cykl publikacji poświęconych standardom bezpieczeństwa pracy w budownictwie.

W kolejnych wydaniach przedstawimy szczegółowo: poszczególne standardy z grupy prac na wysokości, najważniejsze wymagania techniczne, przykłady zastosowania na budowie, dobre praktyki organizacyjne, typowe błędy i sposoby ich unikania.

Każdy artykuł będzie krótkim przewodnikiem po jednym standardzie.

## Zaproszenie dla inżynierów

Jeżeli odpowiadasz za bezpieczeństwo pracy, organizację robót lub nadzór nad budową, standardy są narzędziem dla Ciebie. Są to: uporządkowany materiał, sprawdzony przez praktyków, łatwy do zastosowania, oparty na doświadczeniu największych budów.

Nie zastępują doświadczenia inżyniera. Ale pozwalają organizować pracę na budowie szybciej, bezpieczniej i bardziej świadomie. Bezpieczeństwo na budowie nie jest dziełem przypadku. Jest wynikiem dobrego planowania, właściwych decyzji i stosowania sprawdzonych standardów.

**Urszula Gawrysiak**  
**Dyrektor, Porozumienie dla Bezpieczeństwa**  
**w Budownictwie**



Porozumienie  
dla Bezpieczeństwa  
w Budownictwie

STANDARDY  
BHP

## STANDARDY BHP

### 1.0 Prace szczególnie niebezpieczne



**Prace szczególnie niebezpieczne (3)** to takie, w których ryzyko wypadkowe, ze względu na specyfikę, użyte materiały czy otoczenie wykonywanej pracy, jest wyższe niż w przypadku prac innego rodzaju.

Do obowiązków pracodawcy należy wyszczególnienie wykazu tych prac dla danej jednostki organizacyjnej oraz podjęcie określonych działań przed ich rozpoczęciem.

Standard zawiera minimum wymagań, jakie należy spełnić w celu zapewnienia bezpieczeństwa podczas przygotowania oraz prowadzenia prac szczególnie niebezpiecznych.

#### UWAGA

Do **szczególnie niebezpiecznych (3)** zalicza się większość robót wykonywanych w budownictwie. Towarzyszy im znaczne prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń potencjalnie wypadkowych, a także ciężkich wypadków. Właściwa organizacja pracy, odpowiedzialne zachowania pracowników oraz zastosowanie systemowych rozwiązań zabezpieczenia zbiorowego umożliwiają **eliminację (11)** lub znaczne ograniczenie sytuacji niebezpiecznych.

Właśnie dlatego tego typu prace wymagają właściwego przygotowania oraz szczególnego nadzoru.

#### A. WSTĘP

1. Przed przystąpieniem do prac należy się upewnić, czy są one zaliczane do prac **szczególnie niebezpiecznych (3)**.
2. Są one wymienione w „Wykazie prac szczególnie niebezpiecznych” dostępnym u Pracodawcy oraz uwzględnione w **Planie BIOZ (2)**.

**Do najczęściej pojawiających się w wykazie prac szczególnie niebezpiecznych należą:**

- wykonywane w czynnych zakładach,
  - rozbiórkowe,
  - wykonywane przy użyciu materiałów niebezpiecznych,
  - prowadzone w wykopach o głębokości przekraczającej 1,5 m, przy czynnych urządzeniach i instalacjach podziemnych,
  - prowadzone w przestrzeniach zamkniętych z niewystarczającą wentylacją naturalną oraz ograniczonymi wejściami/ wyjściami,
  - transport pionowy urządzeń ponadgabarytowych oraz materiałów i prefabrykatów o masie powyżej 5 t,
  - pożarowo niebezpieczne, takie m.in. jak spawanie, zgrzewanie papy oraz inne powodujące iskrzenie lub wymagające użycia otwartego ognia,
  - wykonywane na wysokości powyżej 2 m, gdy występuje kilka ryzyk równocześnie, np. prace w dostępie linowym z zagrożeniami typowymi dla przestrzeni zamkniętych,
  - prowadzone w pobliżu urządzeń elektroenergetycznych (20) będących pod napięciem oraz związane z identyfikacją kabli elektroenergetycznych,
  - prowadzone w pobliżu czynnych dróg kołowych i kolejowych.
3. Podstawą do podjęcia pracy jest opracowanie **Instrukcji Bezpiecznego Wykonywania Robót (IBWR) (22)** dla konkretnego zadania, zgodnie ze **Standardem 10.2 IBWR**.
  4. W IBWR oraz Ocenie Ryzyka dla Zadania (ORZ) należy zwrócić szczególną uwagę na:
    - zaplanowanie kolejności działań z uwzględnieniem wymaganych urządzeń, dobór odpowiedniej, wykwalifikowanej kadry oraz zidentyfikowanie wszystkich **zagrożeń (10)** występujących podczas trwania zadania,
    - przyjęcie metod i sposobów eliminacji lub ograniczenia zagrożeń adekwatnie do potrzeb,
    - IBWR musi być napisana językiem zrozumiałym dla osób wykonujących zadanie.
  5. Osoby pracujące, muszą być kompetentne oraz poddawane systematycznym badaniom lekarskim, szkoleniom BHP i instruktażom związanym z występującymi zagrożeniami.





6. Pracowników należy wyposażyć w odzież, obuwie ochronne oraz ŚOI (15) zgodnie ze **Standardami 18.5 Odzież i obuwie** oraz **18.4 ŚOI – sprzęt i ochrony indywidualne**.
7. Wykonywanie niektórych prac szczególnie niebezpiecznych jest możliwe tylko po uzyskaniu pisemnego pozwolenia na ich rozpoczęcie. Pozwolenie ustala zakres prac, wskazuje **bezpośredni nadzór (9)**, odpowiednie środki zabezpieczające oraz zakres instruktażu dla zapewnienia bezpieczeństwa pracowników.
8. Przykładowe wzory pozwoleń na prace tego typu znajdują się w końcowej części standardu.

## B. DZIAŁANIA PODCZAS PROWADZENIA ROBÓT

1. Przygotowanie i przebieg prac szczególnie niebezpiecznych wymaga stałego, wykwalifikowanego i kompetentnego nadzoru.
2. Prace tego typu należy prowadzić w oparciu o zatwierdzoną IBWR, po zapoznaniu z jej zapisami Wykonawców zadania.
3. Zatrudnionych przy pracach szczególnie niebezpiecznych należy systematycznie i szczegółowo instruować w zakresie wymagań bezpieczeństwa obowiązujących przy poszczególnych czynnościach.
4. Wszędzie tam, gdzie jest to konieczne, należy stosować **środki ochrony zbiorowej (ŚOZ) (14)**, które mają pierwszeństwo przed **środkami ochrony indywidualnej (ŚOI) (15)**.
5. Każdy zatrudniony jest zobowiązany do stosowania prawidłowo dobranej odzieży i obuwia ochronnego oraz ŚOI wynikających z ORZ.



Porozumienie  
dla Bezpieczeństwa  
w Budownictwie

STANDARDY  
BHP

### STANDARDY BHP

## 2.0 Prace na wysokości



Standard ten zawiera normy określające podstawowe zasady bezpieczeństwa w trakcie przygotowania oraz prowadzenia **prac na wysokości (4)**.

### UWAGA





Upadki z wysokości są najczęstszą przyczyną wypadków śmiertelnych oraz poważnych urazów ciała. Dlatego przy planowaniu prac na wysokości należy przeprowadzić analizę ryzyka oraz zapewnić środki organizacyjne, techniczne i **kompetentny (7)** nadzór umożliwiający bezpieczną ich realizację.

### A. WSTĘP

1. Prace na wysokości to wszelkie roboty wykonywane na wysokości co najmniej 1 m nad poziomem podłogi lub ziemi.
2. Pracą na wysokości nie jest praca wykonywana niezależnie od wysokości, jeżeli stanowisko pracy jest osłonięte ze wszystkich stron do wysokości co najmniej 1,5 m pełnymi ścianami, ścianami z oknami oszklonymi lub jest wyposażone w inne stałe konstrukcje czy urządzenia chroniące pracownika przed upadkiem z wysokości.
3. Prace na wysokości są zaliczone do **prac szczególnie niebezpiecznych (3)** i należy je realizować zgodnie ze **Standardem 1.0**.
4. Procedury i instrukcje bezpieczeństwa powinny uwzględniać hierarchię zabezpieczenia prac na wysokości. W pierwszej kolejności należy wziąć pod uwagę **eliminację zagrożeń (11)**, następnie zastosować **środki ochrony zbiorowej (14)**, rozwiązania organizacyjne oraz **środki ochrony indywidualnej (15)** (rysunek nr 1 – hierarchia kontroli zagrożeń).

## Analiza i ocena ryzyka

Obowiązuje zasada hierarchii stosowanych środków i rozwiązań  
(od najskuteczniejszych do najmniej skutecznych)

-  **Eliminowanie (u źródła)**
-  **Środki ochrony zbiorowej**
-  **Rozwiązania organizacyjne**
-  **Stosowanie środków ochrony indywidualnej**

Rysunek 1. Hierarchia kontroli zagrożeń.

ver. 1 / 01.2023





Porozumienie  
dla Bezpieczeństwa  
w Budownictwie

STANDARDY  
BHP

#### Eliminowanie (u źródła) przykłady:

- bezpieczny „sam w sobie” proces technologiczny:  
Np. prace montażowe wykonane z poziomu terenu bez długotrwałego narażenia pracowników na upadek z wysokości
- nieszkodliwe surowce, półfabrykaty lub zastąpienie bardziej szkodliwych mniej szkodliwymi  
Np. konstrukcja stalowa zabezpieczona powłokami malarskimi w wytwórni bez konieczności malowania podczas montażu lub ograniczenie do minimum prac malarskich na budowie

#### Środki ochrony zbiorowej przykład:

Np. realizacja prac na wysokości zgodnie z WZZ w oparciu o systemowe zabezpieczenia krawędziowe, zabezpieczenia otworów, stosowanie oston, ekranów

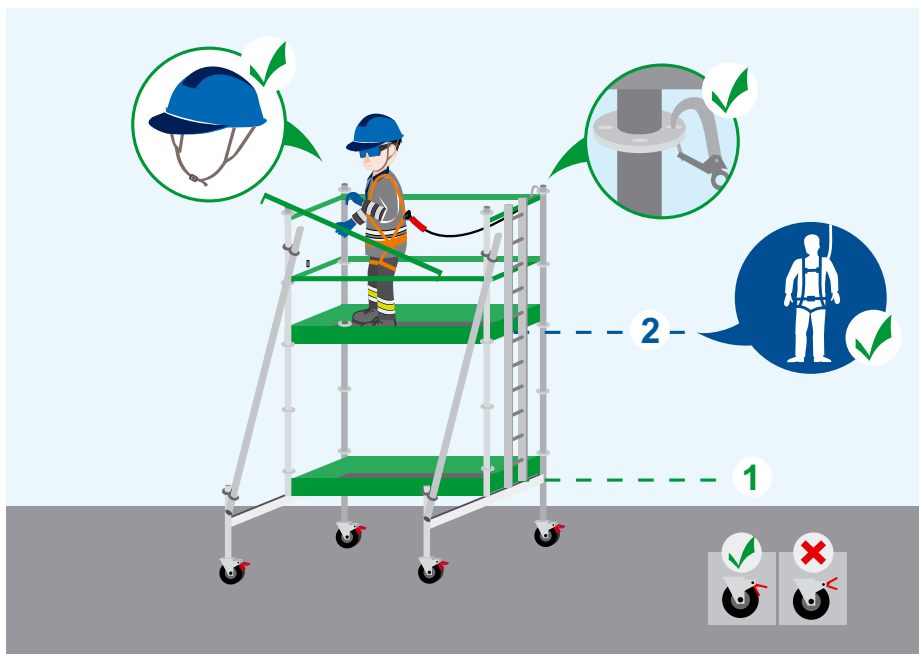
#### Rozwiązania organizacyjne przykłady;

Np. planowanie prac na wysokości zgodnie z WZZ  
Np. zastąpienie ręcznych prac transportowych transportem mechanicznym  
Np. wdrożenie zapisów IBWR wraz z zapoznaniem pracowników, prawidłowe oznakowanie zagrożeń, stosowanie piktogramów

#### Stosowanie środków ochrony indywidualnej:

- właściwy dobór i prawidłowe stosowanie ŚOI w zależności od istniejących zagrożeń

5. Wszystkie osoby pracujące na wysokości mają obowiązek stosowania właściwie dobranych ŚOI (15) i odzieży roboczej, zgodnie z wymaganiami **Standardu 18.4 ŚOI – sprzęt i ochrony indywidualne** oraz **Standardu 18.5 Odzież i obuwie**, w tym:
  - hełmów ochronnych z przynajmniej trzypunktowym paskiem podbródkowym,
  - kamizełek ostrzegawczych min. II klasy widoczności,
  - obuwia ochronnego klasy S3,
  - sprzętu chroniącego przed upadkiem z wysokości dostosowanego do rodzaju ryzyka i prac (rysunek nr 2 – przykład prac na wysokości).



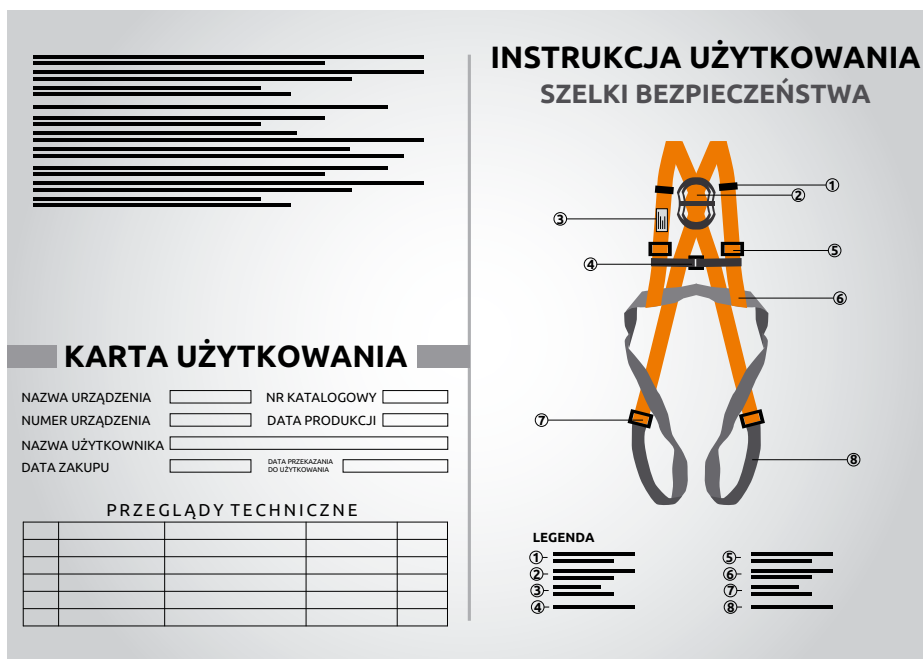
Rysunek 2. Przykład prac na wysokości.

6. ŚOI (15) powinny być kontrolowane przez kompetentnego (7) pracownika. Kontrola powinna być przeprowadzona w obowiązującym terminie, zgodnie z dokumentacją techniczną producenta (rysunek nr 3, przykładowa instrukcja oraz karta użytkowania). Kontrola musi być udokumentowana.




Porozumienie  
dla Bezpieczeństwa  
w Budownictwie

STANDARDY  
BHP



Rysunek 3. Przykładowa instrukcja oraz karta użytkownika.

## B. DZIAŁANIA PRZED ROZPOCZĘCIEM ROBÓT

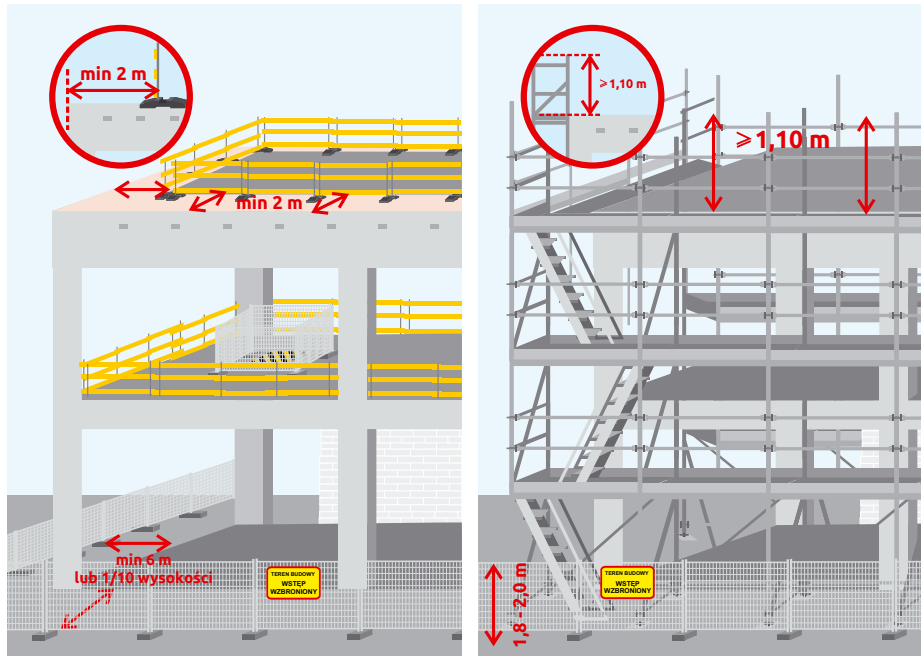
1. Podstawą do podjęcia pracy na wysokości jest opracowanie **Instrukcji Bezpiecznego Wykonywania Robót (IBWR) (22)** dla konkretnego zadania, zgodnie ze **Standardem 10.2 IBWR**.
2. Podstawą do opracowania IBWR jest **Plan Bezpieczeństwa i Ochrony Zdrowia (Plan BIOZ) (2)** oraz projekt wykonawczy dla konkretnego rodzaju robót, a także Standardy BHP oraz wewnętrzne wytyczne danej organizacji.
3. W przypadku prac szczególnie niebezpiecznych, o wysokim poziomie ryzyka, należy wdrożyć pisemne **pozwolenia na prace (18) (Standard 1.0 lub polecenia na prace (18))** zgodnie ze **Standardem 4.2.**, co pozwoli zredukować ryzyka. 
4. Osoby pracujące na wysokości muszą być kompetentne (7). Powinny być również poddawane systematycznym badaniom lekarskim oraz odbywać szkolenia i instruktaże związane z występującymi zagrożeniami.
5. Przed przystąpieniem do wykonywania prac na wysokości, **bezpośrednio nadzorujący pracę (9)** ma obowiązek zapoznać swoich pracowników z IBWR oraz uzyskać pisemne potwierdzenie tego faktu.
6. Stanowiska do prowadzenia prac na wysokości (4) muszą być właściwie zabezpieczone. Miejsce prowadzenia prac należy wygradzić i oznakować w widoczny sposób, a wszelkie otwory trwale zabezpieczyć (**rysunek nr 4** - przykładowe wygradzenie i oznakowanie stanowisk pracy).
7. Powierzchnie wzniesione powyżej 1 m, na których mogą przebywać pracownicy, należy zabezpieczyć systemowymi balustradami ochronnymi, zgodnie ze **Standardem 18.1 Zbiorowe – bariery ochronne (balustrady)** oraz zastosować się do **wytycznych zabezpieczeń zbiorowych (21)** (WZZ) dostępnych na: [http://porozumieniedlabezpieczenstwa.pl/images/aktualnosc/2021/Wytyczne/WZZ\\_Komplet\\_12\\_2021.pdf](http://porozumieniedlabezpieczenstwa.pl/images/aktualnosc/2021/Wytyczne/WZZ_Komplet_12_2021.pdf) Takie same zabezpieczenia należy zastosować również wtedy, jeśli te powierzchnie stanowią przejścia lub dojścia do miejsca pracy.
8. Balustrady powinny być zbudowane z poręczy ochronnych, umieszczonych na wysokości 1,1 m i deski krawężnikowej o wysokości 0,15 m. Pomiędzy poręczą i krawężnikiem, w połowie wysokości, należy umieścić barierę pośrednią lub wypełnić tę przestrzeń w sposób uniemożliwiający wypadnięcie pracownika.





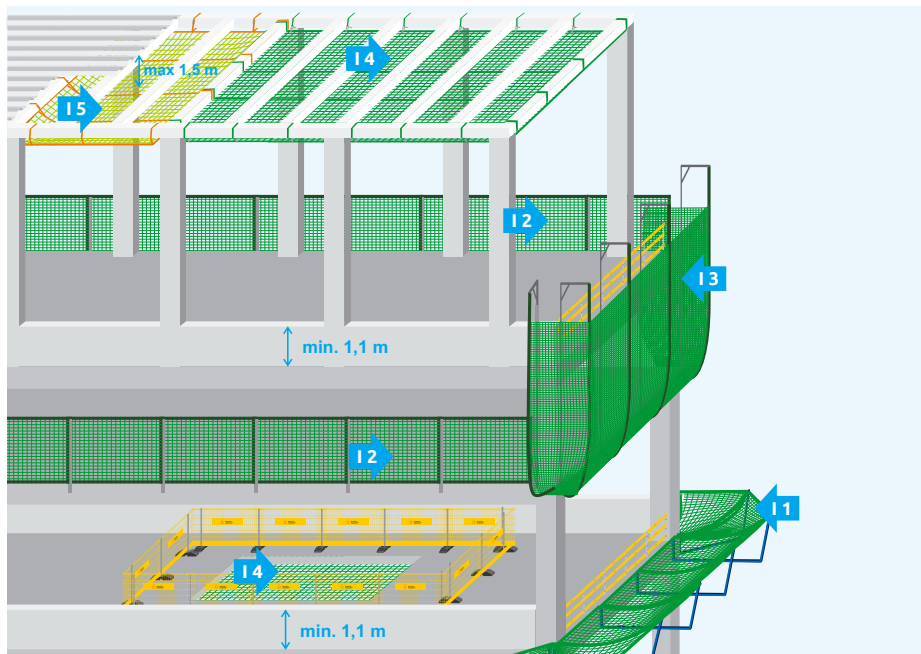
Porozumienie  
dla Bezpieczeństwa  
w Budownictwie

STANDARDY  
BHP



Rysunek 4. Przykładowe wyгородzenie i oznakowanie stanowisk pracy.

9. W zależności od specyfiki robót, miejsce prowadzenia prac na wysokości należy zabezpieczyć siatkami bezpieczeństwa typu S, V, T lub U, zgodnie z projektem zabezpieczenia i montażu oraz **Standardem 18.2 Zbiorowe – siatki bezpieczeństwa** – (rysunek 5). Przed zastosowaniem siatek należy zaprojektować, wskazać i wykonać punkty kotwiczenia indywidualnych środków ochrony pracowników (15) przed upadkiem z wysokości.



Rysunek 5. System ochrony zbiorowych oparty o siatki bezpieczeństwa.



Porozumienie  
dla Bezpieczeństwa  
w Budownictwie

STANDARDY  
BHP

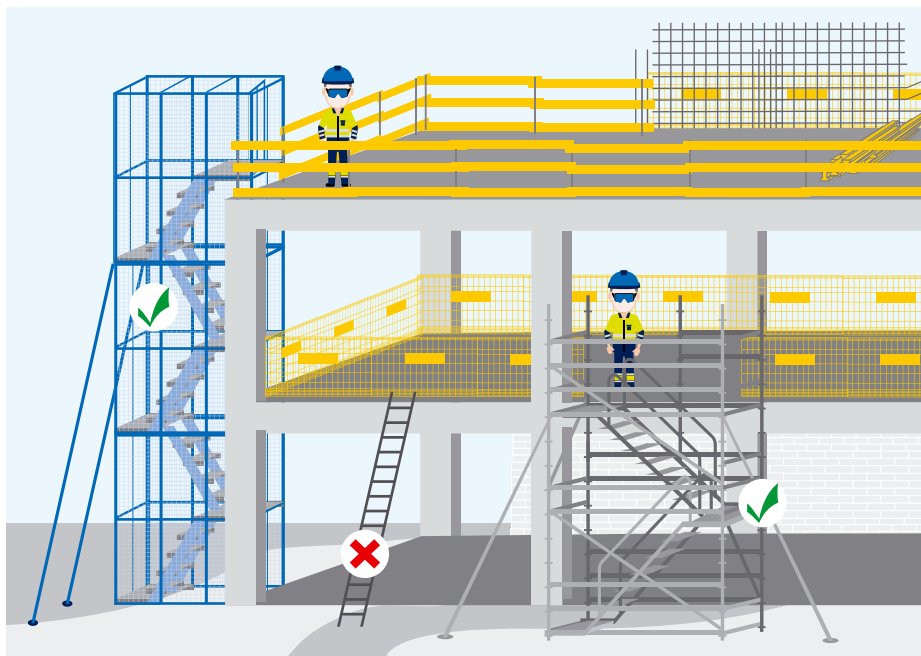
10. Pracownicy wykonujący montaż siatek powinni być poinformowani przez bezpośredni nadzór (9) o rozmieszczeniu i sposobie bezpiecznego montażu punktów kotwienia, np. z podnośników koszowych od spodu (rysunek nr 6).



Rysunek 6. Przykład rozmieszczenia punktów kotwienia w podnośniku nożycowym.

11. Wszyscy pracownicy, którzy wykonują montaż zabezpieczeń zbiorowych na wysokości, powinni być wyposażeni we właściwie dobrane ŚOI (15). Siatki bezpieczeństwa mogą montować wyłącznie pracownicy przeszkoleni w tym zakresie.
12. Jeśli nie ma możliwości zastosowania balustrad ochronnych, można zastosować poziome siatki bezpieczeństwa typu S. Będą one stanowiły ochronę zbiorową na całej powierzchni pod otworami i świetlikami. Siatki powinny się opierać o przęśta konstrukcji. Prace należy przeprowadzić przed wykonaniem docelowego pokrycia dachu.
13. Komunikacja pionowa powinna się odbywać po zamontowanej schodni systemowej (rysunek nr 7).
14. Montażu schodni lub rusztowania mogą dokonywać wyłącznie pracownicy posiadający stosowne uprawnienia w tym zakresie.
15. Schodnie lub rusztowania mogą być dopuszczone do eksploatacji wyłącznie po dokonaniu ich odbioru, potwierdzonego wpisem do dziennika budowy lub odrębnym protokołem, zgodnie z zapisami zawartymi w standardzie szczegółowym **2.2 Rusztowania**.
16. Przed przystąpieniem do prac na wysokości należy skontrolować stan techniczny platform roboczych lub podnośników w oparciu o aktualną decyzję UDT, dziennik konserwacji oraz dzienny protokół kontroli, zgodnie ze **Standardem 2.5 Podesty ruchome**.
17. Niezależnie od rodzaju prac prowadzonych na wysokości, należy wyznaczyć i oznakować **strefę niebezpieczną (6)**. Strefa niebezpieczna w swoim najmniejszym wymiarze liniowym liczoną od płaszczyzny obiektu budowlanego, nie może wynosić mniej niż 1/10 wysokości, z której mogą spadać przedmioty, ale nie mniej niż 6 m.
18. Jeśli wyznaczenie strefy niebezpiecznej (6) jest niemożliwe, należy zastosować inne rozwiązania techniczne lub organizacyjne zabezpieczające przed spadaniem przedmiotów. W takiej sytuacji można skorzystać np. z rusztowań elewacyjnych wg **Standardu 2.2 Rusztowania** i daszków ochronnych wg **Standardu 2.6 Roboty na dachach**. Podobne rozwiązania należy zastosować w przypadku prowadzenia prac na wysokości (4) nad czynnymi ciągami komunikacyjnymi. Do zabezpieczenia ciągów służą daszki ochronne umiejscowione





Rysunek 7. Przykład schodni systemowych

na wysokości nie mniejszej niż 2,4 m nad terenem (punktem odniesienia jest najniższe położone miejsce), nachylone pod kątem 45 stopni, ze spadkiem do ściany obiektu. Rozmiary daszka powinny być co najmniej 0,5 m większe z każdej strony niż szerokość przejścia czy przejazdu.

19. Prace na wysokości (4), które wymagają stosowania ŚOI (15) chroniących przed upadkiem z wysokości, powinny być prowadzone przez minimum dwie osoby.
20. Przed rozpoczęciem pracy należy sprawdzić zarówno stan techniczny punktów kotwienia indywidualnego sprzętu chroniącego przed upadkiem z wysokości, jak i stan samego sprzętu.
21. Przed przystąpieniem do pracy należy dokonać wizualnej oceny stanu technicznego siatek bezpieczeństwa i balustrad ochronnych.
22. Należy zadbać o środki techniczno-organizacyjne, które w razie potrzeby zapewnią skuteczną asekurację i ewakuację pracowników, w tym również ewakuację po upadku do siatki lub przestrzeni otwartej. Pracownicy powinni być wyposażeni w skuteczne środki łączności, takie jak radiotelefony czy telefony komórkowe.
23. Przed przystąpieniem do prac należy ocenić, czy istnieje możliwość przeprowadzenia skutecznej akcji ratunkowej w razie wypadku, wg **Standardu 17.5 Plan ewakuacji, instrukcje awaryjne**.

### C. DZIAŁANIA PODCZAS PROWADZENIA ROBÓT

1. Osoba z bezpośredniego nadzoru (9) ma obowiązek upewnić się, czy pracownicy wykonujący prace na wysokości (4) są zabezpieczeni przed upadkiem, zgodnie z hierarchią z punktu A. 4. W przypadku uchybień lub braków w zabezpieczeniu, bezpośredni nadzór (9) ma obowiązek wstrzymać prace do czasu wprowadzenia jej bezpiecznych metod.
2. W przypadku używania sprzętu ochrony osobistej podczas prac na wysokości, wymagana jest obecność co najmniej dwóch osób, a roboty prowadzi się pod bezpośrednim nadzorem (9) w oparciu o **Standard 1.0**.
3. Jeżeli podczas prowadzenia prac zachodzi konieczność zmiany punktu kotwienia, należy wyposażyć pracownika w system łącząco- amortyzujący (tzw. dwie linki). Takie rozwiązanie umożliwi przepinanie się pomiędzy punktami kotwienia, zgodnie ze **Standardem 2.1 Roboty na dużych wysokościach**.
4. Niezależnie od zastosowanych środków ochrony zbiorowej (14), np. barier ochronnych (balustrad) i środków ochrony indywidualnej (15), wszędzie tam, gdzie jest to konieczne, należy stosować siatki bezpieczeństwa.



**Porozumienie**  
dla Bezpieczeństwa  
w Budownictwie

STANDARZY  
**BHP**

- Dodatkowo teren prowadzenia prac należy wygrodzić i oznakować jako strefę niebezpieczną (6).
5. Prowadzenie prac w sąsiedztwie napowietrznych linii elektroenergetycznych wymaga zastosowania dodatkowej procedury, zgodnie ze **Standardem 4.4 Praca w sąsiedztwie linii elektroenergetycznych**.
  6. Prowadzenie prac nad akwenami wodnymi wymaga dodatkowo zastosowania **Standardu 13.5 Roboty na wodzie, z wody oraz w kesonach**.
  7. Wykonywanie prac na wysokości z rusztowania wymaga dodatkowo zastosowania, **Standardu 2.2 Rusztowania**.
  8. Montaż urządzeń (rusztowania) oraz przeglądy techniczne powinny być wykonywane przez pracowników posiadających stosowne uprawnienia, zgodnie z instrukcją, dokumentacją techniczną lub projektową.
  9. Osoby pracujące z podestów ruchomych, podnośników lub platform roboczych, muszą mieć aktualne uprawnienia oraz świadectwo kwalifikacji do obsługi tych urządzeń. Dodatkowo pracownicy powinni być wyposażeni w ŚOI (15) chroniące ich przed upadkiem z wysokości. Zabezpieczenia te powinny być wpięte w punkty kotwienia wskazane przez producenta danego urządzenia.
  10. Użytkując drabinę jako tymczasowy ciąg komunikacyjny lub wykonując prace z drabin, należy postępować zgodnie ze **Standardem 2.4 Drabiny**.
  11. Wszystkie otwory znajdujące się na poziomie wykonywanej pracy należy zabezpieczyć nieprzesuwными przykrywami.
  12. Dobrą praktyką jest stosowanie podwójnego zabezpieczenia otworów w postaci szczelnych przykryw oraz wygrodzenia balustradami, zgodnie ze **Standardem 18.1 Zbiorowe – bariery ochronne (balustrady)**.
  13. W okresie zimowym należy na bieżąco likwidować oblodzenie elementów nad i w ciągach komunikacji poziomej i pionowej, zgodnie ze **Standardem 10.5 Praca w warunkach zimowych**.



#### D. DZIAŁANIA PO ZAKOŃCZENIU PRAC

1. Ze stanowisk pracy należy uprzątnąć wszystkie narzędzia i materiały lub zabezpieczyć je tak, aby nie spadły z wysokości.
2. Ciągi komunikacji pionowej należy zabezpieczyć przed ewentualnym wejściem osób postronnych.



#### ZABRANIA SIĘ:

1. Montażu i demontażu schodni i rusztowań przez pracowników, którzy nie mają stosownych uprawnień w tym zakresie.
2. Używania jako poręczy i krawężników w balustradach ochronnych tarcicy o grubości poniżej 32 mm z widocznymi pęknięciami, przebarwieniami i licznymi sękami.
3. Eksploatacji schodni i rusztowań w czasie burzy lub wiatru o prędkości przekraczającej 10 m/s.
4. Użytkowania elementów indywidualnego sprzętu chroniącego przed upadkiem z wysokości i siatek, które wcześniej były używane do powstrzymywania spadania.
5. Samowolnego kotwiczenia indywidualnego sprzętu chroniącego przed upadkiem z wysokości do elementów do tego nieprzeznaczonych, zapinania linek asekuracyjnych o elementy na tzw. „zaciąg”.
6. Odkładania narzędzi oraz materiałów na wznoszonych ścianach, konstrukcjach oraz innych miejscach, z których mogą spaść.
7. Stosowania drabin jako drogi stałego transportu, a także przenoszenia przy użyciu drabiny ciężarów o masie powyżej 10 kg.
8. Wykonywania innych robót budowlanych w strefach niebezpiecznych wyznaczonych na czas prowadzenia prac na wysokości.
9. Montażu siatek bezpieczeństwa przez osoby, które nie zostały przeszkolone w tym zakresie.
10. Montażu siatek bez wymaganego przeglądu okresowego, ze stwierdzonymi uszkodzeniami oczek, lin granicznych, lin łączących i punktów zakotwiczenia.



# Branża budowlana ponownie razem na rzecz bezpieczeństwa

Porozumienie dla Bezpieczeństwa w Budownictwie, organizacja zrzeszająca czołowe firmy budowlane w naszym kraju, zorganizowała kolejną, już III edycję Turnieju Pierwszej Pomocy. Wydarzenie jest wstępem do Tygodnia Bezpieczeństwa, którego zadaniem jest podwyższanie standardów w zakresie ochrony życia i zdrowia w sektorze budowlanym.

*– Za każdym razem, gdy obserwujemy uczestników Turnieju, mamy świadomość, że uczą się oni czegoś, co może kiedyś uratować czyjeś życie... być może kolegi z pracy, a może zupełnie obcej osoby spotkanej na ulicy. Te scenariusze, choć są symulacją, pokazują jak nieprzewidywalne i nagłe potrafią być sytuacje zagrożenia. Dlatego tak ważne jest, by nie bać się reagować. Ten Turniej buduje nie tylko umiejętności, ale też odwagę i poczucie odpowiedzialności za drugiego człowieka. To dla nas ogromna wartość i powód, dla którego chcemy tę inicjatywę rozwijać* – mówi Urszula Gawrysiak, dyrektorka Porozumienia dla Bezpieczeństwa w Budownictwie.

W zawodach, które odbyły się 23.04.2026 r. w Wildze na Mazowszu wystartowały reprezentacje 14 firm z branży budowlanej. Razem z widownią oraz zespołem ratowników w wydarzeniu wzięło udział prawie 140 osób. Podczas zawodów każda z drużyn musiała przejść w sumie 14 stacji, na których zetknęła się ze zróżnicowanymi scenkami. Pozorowane sytuacje odzwierciedlały możliwe momenty zagrożenia życia i zdrowia, które mogą przydarzyć się zarówno na budowach, jak i w życiu codziennym. Pałący się samochód, dławiące się dziecko, porażenie prądem i wiele innych – w takich przykładowych sytuacjach uczestnicy musieli wykazać się opanowaniem oraz dobrą współpracą



zespołową. Za przygotowanie wyzwań odpowiadali specjaliści z Centrum Ratownictwa, które jest merytorycznym partnerem wydarzenia.

Jak co roku główną ideą wydarzenia jest zjednoczenie się wokół nadrzędnego celu – wzmacniania kultury bezpieczeństwa i promocja szeroko rozumianego ratownictwa, również obywatelskiego. Europejska Rada Resuscytacji podaje, że co roku u 400 tys. Europejczyków dochodzi do nagłego zatrzymania krążenia. W zdecydowanej większości przypadków (u ok. 350 tys. ludzi) zdarza się to poza szpitalem – w domu, w miejscu pracy, na ulicy. Zanim przyjedzie pogotowie, mija zwykle kilka-kilkanaście minut. To bezcenny czas, który może zdecydować o tym, czy ktoś przeżyje. Choć podczas pozorowanych akcji ratowniczych nie brakuje emocji, to dodatkowo wrażeń uczestnikom dodaje fakt, że pomoc, której udzielają, jest oceniana przez profesjonalistów. Na bazie punktacji z każdej ze scen wyłaniani są zwycięzcy turnieju. W tym roku na podium stanęły drużyny:

- Miejsce 1: Hochtief,
- Miejsce 2: Unibep,
- Miejsce 3: Polaqua.

Tegoroczny Turniej Pierwszej Pomocy jest wydarzeniem poprzedzającym XIII Tydzień Bezpieczeństwa, zaplanowany na 11–17 maja 2026 roku. To czas wspólnych działań całej branży na rzecz wzmacniania świadomości, rozwijania dobrych praktyk i budowania środowiska pracy, w którym ochrona zdrowia i życia pozostaje absolutnym priorytetem.

# Słowo wstępne od Dziekana

Prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz, Dziekan Wydziału Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska



Wydział Inżynierii Lądowej ma długą tradycję. W 2026 roku, jako jeden z czterech najstarszych wydziałów, obchodzimy jubileusz 200-lecia Politechniki Warszawskiej. Ta tradycja zobowiązuje do pielęgnowania jego historii, pamięci o wielu wybitnych profesorach, którzy kształcili pokolenia inżynierów, realizowali jednocześnie

śmiałe i ponadczasowe obiekty budowlane. Jest to również zobowiązanie do stałego podnoszenia standardów badań, dydaktyki i współpracy z otoczeniem. Jest to szczególnie istotne w ostatnich latach, gdy inżynieria lądowa zmienia się szybciej niż kiedykolwiek wcześniej.

XXI wiek to okres wzmożonego zainteresowania innowacjami w budownictwie. Ich wdrożenie stwarza szansę na spełnienie oczekiwań, wynikających z dynamicznie zmieniającego się otoczenia, w tym globalnych wyzwań związanych z cyfryzacją, gospodarką niskoemisyjną czy gospodarką cyrkularną.

Strategiczne cele rozwoju wydziału ukierunkowane są między innymi na zapewnienie wysokiej jakości kształcenia i dostosowanie oferty edukacyjnej do potrzeb gospodarczych i społecznych. Zwracamy szczególną uwagę na wiedzę podstawową, bowiem właśnie taka wiedza zapewnia szybkie dostosowanie się do zmieniających się oczekiwań pracodawców. Z drugiej strony konieczna jest zmiana form nauczania. Uczelnie wchodzące razem z PW w skład sieci uniwersytetów ENHANCE oferują różnego rodzaju programy zwiększenia elastyczności i unowocześnienia oferty edukacyjnej oraz dostosowania jej do zróżnicowanych ścieżek rozwoju studentów, np. przez prowadzenie kierunków studiów rozszerzonych o moduły interdyscyplinarne, wprowadzanie do programów studiów metod kształcenia opartych

na *Project-Based Learning* i *Research Based Education*, tworzenie możliwości uzyskiwania mikropoświadczeń (*micro-credentials*). Tego rodzaju rekomendacje zawarte są też w stanowisku Senatu Politechniki Warszawskiej z 2025 roku pt. „Zestaw zaleceń oraz dobrych praktyk w zakresie wprowadzania do programów studiów innowacyjnych form i metod kształcenia w Politechnice Warszawskiej”.

Artykuły prezentowane w niniejszym numerze „Przeglądu Budowlanego” pokazują, że powyższe zalecenia są już wdrażane w działalności dydaktycznej naszego wydziału. W tym roku odbyła się już 9. edycja uznanego międzywydziałowego projektu interdyscyplinarnego mpiBIM organizowanego przez 5 wydziałów Politechniki Warszawskiej. W ramach projektu OMNIS 2 finansowanego przez NCBR,



Jubileuszowa inauguracja roku akademickiego od lewej: dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek, Prodziekan ds. studenckich WIL PW, prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz, Dziekan WIL PW, dr inż. Małgorzata Superczyńska, Prodziekan ds. Studiów, WIL PW

jako pierwsi w kraju, wdrażamy program jednolitych studiów magisterskich. Wspieramy projekty realizowane przez koła naukowe, a także włączamy studentów w projekty realizowane przez zespoły badawcze. Mamy jednak świadomość, że to początek drogi, która sprawi, że budownictwo będzie postrzegane jako nowoczesna i interdyscyplinarna dziedzina działalności inżynierskiej, atrakcyjna dla nowych pokoleń kandydatów na kierunek Budownictwo.

# Sukces ma wielu autorów. Studencki ruch naukowy jako siła Wydziału

dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek, Prodziekan ds. studenckich Wydziału Inżynierii Lądowej,  
Politechnika Warszawska



Rok jubileuszu 200-lecia Politechniki Warszawskiej oraz Wydziału Inżynierii Lądowej to czas szczególnie – moment refleksji nad dziedzictwem – bogatą historią i dorobkiem pokoleń inżynierów, ale także nad tym, co stanowi o sile naszej społeczności akademickiej dziś. A jej najpełniejszym wyrazem jest współdziałanie – studentów i nauczycieli akademickich.

W tym wyjątkowym, jubileuszowym wydaniu, będącym wizytówką studenckiego ruchu naukowego na Wydziale, zebraliśmy artykuły, które nie tylko dokumentują aktywność studentów, lecz ukazują dobrze funkcjonujący ekosystem kształcenia, w którym wiedza, doświadczenie i pasja przenikają się, tworząc przestrzeń dla rozwoju młodych inżynierów. Spośród naszych 1188 studentów niespełna 10% działa w 13 wydziałowych kołach naukowych, Klubie Turystyki Wszelakiej Dreptak oraz Wydziałowej Radzie Samorządu. W numerze nie udało się pomieścić całej energii, zaangażowania i pasji studentów naszego wydziału, dlatego zebrano w artykułach tylko wycinek tego, co i jak studiuje, jak się motywują, przygotowują i z kim rywalizują, w jakich pracach badawczo-rozwojowych i projektach uczestniczą oraz jakie piszą prace dyplomowe. Przy okazji często stają na krajowych i międzynarodowych podiach i osiągają spektakularne sukcesy, rozsławiając dobre imię Politechniki Warszawskiej i zachęcając kolejnych kandydatów. To jakby opowieść o Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej ustami studentów i ich opiekunów.

Publikacje prezentują szerokie spektrum działalności studenckiej – od realizacji nowych form zajęć dydaktycznych, aktywności w kołach naukowych, przygotowania do krajowych i międzynarodowych konkursów, po organizację wydarzeń naukowych i edukacyjnych. Za wszystkimi stoją zaangażowani opiekunowie, którzy nie tylko wspierają studentów merytorycznie, lecz także inspirują, stawiają wymagania i tworzą warunki do podejmowania ambitnych wyzwań. Artykuły zawarte w numerze pokazują również, jak wysoki poziom przygotowania studentów kierunku Budownictwo przekłada się na ich aktywność badawczą. Młodzi inżynierowie podejmują zaawansowane zagadnienia z zakresu technologii materiałów, modelowania numerycznego czy optymalizacji

procesów projektowych, wnosząc realny wkład w rozwój nauki i praktyki inżynierskiej. Jest to możliwe dzięki solidnym podstawom zdobywanym w toku studiów oraz wysokim kompetencjom kadry dydaktycznej, która skutecznie łączy teorię z praktyką i przygotowuje studentów do pracy w wymagającym, dynamicznie zmieniającym się środowisku. Tak jak zajęcia w formule mpiBIM, które są doskonałym przykładem nowoczesnego kształcenia, rozwijającym jednocześnie umiejętność pracy w zespołach interdyscyplinarnych, a to nie jedyne przedsięwzięcie o takim charakterze. Współpraca studentów z różnych wydziałów, wspierana przez opiekunów i ekspertów zewnętrznych, która prowadzi do powstawania projektów odpowiadających na współczesne wyzwania cywilizacyjne i technologiczne. To właśnie w takich inicjatywach kształtują się kompetencje przyszłości – umiejętność pracy zespołowej, komunikacji i integracji wiedzy z różnych obszarów. Nie mniej ważna jest rola studentów jako organizatorów wydarzeń – twórców konkursów, warsztatów i inicjatyw edukacyjnych, które stają się „areną doświadczeń” dla uczestników z innych uczelni, uczniów szkół średnich oraz przyszłych kandydatów na studia. W ten sposób studencki ruch naukowy pełni funkcję pomostu między edukacją a praktyką oraz między pokoleniami przyszłych inżynierów. Szczególnie można było to podziwiać w dwóch już zakończonych edycjach konkursu „Dźwigar w dechę”, który przynosi bardzo konkretne, wielowymiarowe efekty – nie jest tylko wydarzeniem, lecz realnym narzędziem kształcenia i integracji środowiska. Konkurs buduje kompetencje, których nie da się wykształcić wyłącznie na zajęciach – łączy wiedzę, praktykę, emocje i odpowiedzialność za własny projekt. Dodatkowo jest cenny popularyzatorsko – w ten sposób nasi studenci naturalnie zachęcają do pogłębiania wiedzy inżynierskiej i kompetencji budowlanych oraz pokazują uczniom szkół średnich konkretne perspektywy edukacyjne na politechnice. Nieoceniona pod tym względem jest również organizowana przez wydział Olimpiada Wiedzy i Umiejętności Budowlanych.

Oddawany numer jest więc nie tylko przeglądem osiągnięć, ale także świadectwem współpracy i wspólnej odpowiedzialności za kształcenie przyszłych inżynierów. To opowieść o sukcesie, który ma wielu autorów – studentów pełnych pasji i odwagi oraz ich mentorów, którzy potrafią tę energię ukierunkować i wzmocnić.

Z przekonaniem możemy stwierdzić, że fundamenty pod kolejne dekady rozwoju zostały już zbudowane – solidnie, świadomie i z myślą o przyszłości.

# Droga do zawodu inżyniera budownictwa na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

dr inż. Małgorzata Superczyńska (ORCID:0000-0001-6603-0577), prodziekan ds. studiów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska



Współczesne kształcenie na kierunku Budownictwo podlega dynamicznym przemianom, wynikającym zarówno z rozwoju technologicznego, jak i rosnących wymagań rynku pracy. Uczelnie techniczne, kształcące przyszłych inżynierów, stają przed koniecznością dostosowania programów studiów do aktualnych trendów w branży budowlanej,

obejmujących m.in. cyfryzację procesów projektowych, wdrażanie nowoczesnych narzędzi inżynierskich oraz rozwój kompetencji praktycznych i interpersonalnych. Istotnym elementem procesu dydaktycznego staje się integracja wiedzy teoretycznej z umiejętnościami praktycznymi, w tym realizowana we współpracy z otoczeniem gospodarczym.

Na Wydziale Inżynierii Lądowej realizowane jest kształcenie na kierunku Budownictwo, w ramach elastycznego systemu studiów, dostosowanego do zróżnicowanych potrzeb studentów. Oferowane są studia w trybie stacjonarnym na I i II stopniu, a od roku akademickiego 2025/2026 również w formie jednolitych studiach magisterskich. Studenci mogą wybrać kształcenie w języku angielskim, co przygotowuje ich też do pracy w środowisku międzynarodowym. Uzupełnieniem oferty są studia niestacjonarne, umożliwiające zdobywanie kompetencji w obszarze budownictwa przy jednoczesnym łączeniu nauki z aktywnością zawodową.

Od kilku lat obserwuje się niesłabnące zainteresowanie kierunkiem Budownictwo, które jest jednym z najchętniej wskazywanych przez kandydatów na studia w Politechnice Warszawskiej.

W rekrutacji na rok akademicki 2025/2026 Budownictwo wskazało 1358 kandydatów, wyprzedzając kierunki, takie jak: Zarządzanie (1091 aplikacji), Mechatronika (1062 aplikacje), Cyberbezpieczeństwo (1053 aplikacje), Lotnictwo i kosmonautyka (1038 aplikacji). W poprzednich latach było to odpowiednio 1199 i 1136 aplikacji.

Liczba studentów przyjętych na studia stacjonarne utrzymuje się na stabilnym poziomie (tab. 1), a wprowadzone po raz pierwszy do oferty jednolite studia magisterskie cieszyły się bardzo dużym zainteresowaniem, co pozwoliło na uruchomienie tego programu studiów w pilotażowej formule.

Liczbę studentów przyjmowanych na studia niestacjonarne pokazano w tabeli 2.

Od października roku akademickiego 2025/2026 nowo-przyjęci studenci realizują zmienione programy studiów, głównie w zakresie aktualizacji efektów uczenia się i dostosowania treści programowych do aktualnych potrzeb rynku pracy. Jest to odpowiedź na potrzebę kształcenia inżynierów budownictwa przygotowanych kompleksowo w zakresie globalnych zmian klimatu, cyfryzacji i innych aspektów branżowych polegających na wprowadzeniu elementów kształcenia uwzględniających zmiany klimatyczne, zasady projektowania i realizacji obiektów zgodnie z gospodarką o obiegu zamkniętym, przy zastosowaniu niskoemisyjnych materiałów i technologii.

W ramach projektu OMNIS 2 finansowanego przez NCBR przygotowano również program jednolitych studiów magisterskich

**Tabela 1.** Liczba studentów przyjętych na studia stacjonarne w ostatnich 5 latach

| Forma studiów                         | 2021/2022 | 2022/2023 | 2023/2024 | 2024/2025 | 2025/2026 |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Studia I stopnia (inżynierskie)       | 283       | 307       | 302       | 317       | 255*      |
| Studia II stopnia (magisterskie)      | 70        | 48        | 50        | 36        | 53        |
| Studia I stopnia w języku angielskim  | 13        | 60        | 53        | 40        | 36        |
| Studia II stopnia w języku angielskim | 13        | 9         | 8         | 13        | 0         |
| Jednolite studia magisterskie         | -         | -         | -         | -         | 69        |

\*przy obniżonym limicie przyjęć do 240 osób

**Tabela 2.** Liczba studentów przyjętych na studia niestacjonarne w ostatnich 5 latach

| Forma studiów                    | 2021/2022 | 2022/2023 | 2023/2024 | 2024/2025 | 2025/2026 |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Studia I stopnia (inżynierskie)  | 97        | 95        | 76        | 85        | 87        |
| Studia II stopnia (magisterskie) | 91        | 68        | 67        | 59        | 52        |

oraz studiów w języku angielskim w zmienionej strukturze kształcenia, w celu zapewnienia porównywalności z programami uczelni partnerskich z UE.

Jednym z kluczowych elementów procesu dydaktycznego na kierunku Budownictwo na Wydziale Inżynierii Lądowej jest zróżnicowanie ścieżek kształcenia, umożliwiających studentom pogłębienie wiedzy w wybranych obszarach inżynierii lądowej. Oferta specjalności odpowiada zarówno na tradycyjne filary dyscypliny, jak i na współczesne wyzwania technologiczne, środowiskowe oraz organizacyjne sektora budowlanego (tab. 3).

Konstrukcje Budowlane i Inżynierskie stanowią jedną z podstawowych i najchętniej wybieranych specjalności. Kształcenie koncentruje się na projektowaniu, analizie i realizacji różnorodnych obiektów budowlanych, z uwzględnieniem nowoczesnych materiałów oraz zaawansowanych narzędzi obliczeniowych. Studenci zdobywają kompetencje w zakresie modelowania konstrukcji, ich bezpieczeństwa oraz trwałości. Specjalność Inżynieria Produkcji Budowlanej ukierunkowana jest na zagadnienia związane z organizacją i zarządzaniem procesem inwestycyjnym. Program obejmuje planowanie robót budowlanych, logistykę placu budowy oraz wykorzystywanie narzędzi cyfrowych wspierających zarządzanie projektami. Absolwenci są przygotowani do pełnienia funkcji kierowniczych i organizacyjnych w sektorze budownictwa.

W ramach specjalności Mosty i Budowle Podziemne studenci zdobywają wiedzę dotyczącą projektowania oraz eksploatacji obiektów inżynierskich o szczególnym stopniu złożoności, w tym mostów, tuneli i innych obiektów infrastrukturalnych. Istotnym elementem kształcenia są zagadnienia dotyczące diagnostyki i utrzymania tych obiektów. Specjalność Budownictwo Niskoemisyjne odpowiada na rosnące znaczenie zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Program obejmuje tematykę efektywności energetycznej,

ograniczania emisji gazów cieplarnianych, wykorzystywania odnawialnych źródeł energii oraz nowoczesnych materiałów o obniżonym śladzie węglowym.

Specjalności Budownictwo Drogowe i Budownictwo Szynowe związane są z projektowaniem, budową i utrzymaniem infrastruktury transportowej. Studenci poznają technologię realizacji dróg, autostrad oraz linii kolejowych, a także zasady organizacji ruchu i zarządzania infrastrukturą transportową. W programie uwzględniono nowoczesne rozwiązania materiałowe i technologiczne stosowane w tej branży. Specjalność Teoria Konstrukcji skierowana jest do studentów zainteresowanych zaawansowanymi metodami obliczeniowymi oraz modelowaniem zjawisk zachodzących w konstrukcjach.

W ofercie jednolitych studiów magisterskich, alternatywnie do wyboru wąskich zakresów specjalizacyjnych proponowane są dwie szersze ścieżki dyplomowania. Są to Budownictwo Ogólne i Przemysłowe oraz Budownictwo Infrastrukturalne (tab. 3).

Na studiach II stopnia prowadzonych w języku angielskim do wyboru są trzy specjalności (tab. 4).

Building Construction and Structural Engineering to specjalność skoncentrowana na projektowaniu i analizie konstrukcji budowlanych. Studenci zdobywają umiejętność projektowania obiektów kubaturowych i inżynierskich z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi obliczeniowych, z uwzględnieniem bezpieczeństwa, trwałości oraz efektywności ekonomicznej rozwiązań konstrukcyjnych.

Specjalność Infrastructure and Geotechnical Engineering obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z infrastrukturą oraz inżynierią geotechniczną. Kształcenie koncentruje się na projektowaniu i realizacji obiektów infrastrukturalnych, takich jak drogi, linie kolejowe, mosty czy objekty podziemne. Istotnym elementem programu są również zagadnienia związane z modelowaniem podłoża gruntowego

**Tabela 3.** Programy studiów realizowanych na kierunku Budownictwo od roku akademickiego 2025/2026 w języku polskim

|  | Jednolite studia magisterskie |  | Studia I stopnia |             | Studia II stopnia |     |
|--|-------------------------------|--|------------------|-------------|-------------------|-----|
|  | ST                            |  | ST               | NST         | ST                | NST |
| ST – stacjonarne,<br>NST – niestacjonarne  |                               |  |                  |             |                   |     |
| Liczba semestrów   | 10                            |  | 8                | 9           | 3                 | 4   |
| Forma  | Ścieżka dyplomowania          |  |                  | Specjalność |                   |     |
| Konstrukcje Budowlane i Inżynierskie   | +                             |  | +                |             | +                 |     |
| Inżynieria Produkcji Budowlanej  | +                             |  | +                |             | +                 |     |
| Mosty i Budowle Podziemne  | +                             |  | +                |             | +                 |     |
| Budownictwo Niskoemisyjne  | +                             |  | +                |             | +                 |     |
| Budownictwo Drogowe i Szynowe  | +                             |  |                  |             | –                 |     |
| Teoria Konstrukcji   | +                             |  | –                |             | +                 | –   |
| Budownictwo Drogowe  | –                             |  | +                |             | +                 |     |
| Drogi Szynowe  | –                             |  | +                |             | +                 |     |
| Studia jednolite magisterskie: alternatywnie do powyższych:<br>• Budownictwo Ogólne i Przemysłowe<br>• Budownictwo Infrastrukturalne | +                             |  |                  |             |                   |     |

**Tabela 4.** Programy studiów realizowanych na kierunku Budownictwo od roku akademickiego 2025/2026 w języku angielskim

|  | Studia I stopnia w języku angielskim | Studia II stopnia w języku angielskim |
|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| ST – stacjonarne, NST – niestacjonarne           | ST                                   | ST                                    |
| Liczba semestrów                                 | 7                                    | 4                                     |
| Forma  | -                                    | Ścieżka dyplomowania                  |
| Building Construction and Structural Engineering |                                      | +                                     |
| Infrastructure and Geotechnical Engineering      |                                      | +                                     |
| Management and Sustainable Engineering           |                                      | +                                     |

oraz oceną stateczności konstrukcji ziemnych.

Management and Sustainable Engineering to specjalność łącząca aspekty techniczne z kompetencjami w zakresie zarządzania oraz zrównoważonego rozwoju. Program obejmuje zagadnienia organizacji i zarządzania procesem inwestycyjnym, planowania i kontroli realizacji projektów budowlanych, a także ekonomiki budownictwa. Szczególny nacisk położony jest na rozwiązania sprzyjające ograniczeniu wpływu inwestycji na środowisko, w tym efektywność energetyczną, gospodarkę zasobami oraz wdrażanie zasad zielonej transformacji w sektorze budowlanym.

Kierunek Budownictwo na Wydziale Inżynierii Lądowej, reprezentujący dyscyplinę Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, uzyskał kategorię naukową A w ocenie parametrycznej za lata 2013–2016 oraz 2017–2022. Jest to potwierdzenie wysokiej aktywności badawczej, a co za tym idzie wysokiej jakości kadry dydaktycznej i kontaktu studentów z aktualnymi wynikami badań i nowoczesnymi rozwiązaniami technicznymi stosowanymi w budownictwie.

Istotnym potwierdzeniem jakości kształcenia jest również akredytacja KAUT (Komisji Akredytacyjnej Uczelni Technicznych), która potwierdza spełnienie rygorystycznych standardów dotyczących programów studiów, infrastruktury dydaktycznej, kompetencji kadry oraz współpracy z otoczeniem społeczno-gospodarczym. Dlatego każdy Absolwent Wydziału wraz z dyplomem ukończenia studiów na kierunku Budownictwo otrzymuje certyfikat EUR-ACE® Label, czyli potwierdzenie uzyskania tytułu Inżyniera Europejskiego.

W ostatnich latach kierunek Budownictwo Politechniki Warszawskiej regularnie zajmuje miejsce na podium Rankingu Szkół Wyższych „Perspektywy”. Jest to kolejne potwierdzenie, że kierunek nie tylko spełnia wysokie standardy, ale również skutecznie odpowiada na zmieniające się potrzeby nowoczesnego budownictwa i gospodarki, a dyplom ukończenia studiów na Wydziale Inżynierii Lądowej jest rozpoznawalny i ceniony przez pracodawców.

Istotnym elementem procesu kształcenia na kierunku Budownictwo jest współpraca z otoczeniem społeczno-gospodarczym, w szczególności z przedsiębiorstwami sektora budowlanego, biurami projektowymi, jednostkami administracji publicznej oraz instytucjami badawczo-rozwojowymi. Realizowane formy współdziałania obejmują m.in. konsultacje programów studiów z przedstawicielami branży, udział praktyków w procesie dydaktycznym, organizację praktyk i staży zawodowych, a także wspólne projekty badawcze i wdrożeniowe.

Główną platformę współpracy stanowi powołany 2009 roku Zespół Doradców Dziekana, a od 2026 roku Rada Społeczno-Gospodarcza na Wydziale Inżynierii Lądowej, złożona z przedstawicieli środowiska gospodarczego, instytucji publicznych, organizacji branżowych oraz ekspertów związanych z sektorem budownictwa i infrastruktury.

Absolwenci opuszczają wydział jako wszechstronnie przygotowani inżynierowie, gotowi do podejmowania odpowiedzialnych zadań w całym procesie inwestycyjnym – od projektowania, przez realizację, aż po eksploatację i diagnostykę obiektów budowlanych. W trakcie studiów zdobywają wiedzę z zakresu budownictwa kubaturowego, przemysłowego i infrastrukturalnego uwzględniającą nowoczesne materiały, technologie oraz zasady organizacji robót budowlanych. Uczą się świadomego wykorzystywania technologii cyfrowych wspierających współczesną praktykę inżynierską. Aktywnie uczestniczą w realizacji przedsięwzięć o różnej skali, z uwzględnieniem zasad zrównoważonego rozwoju i odpowiedzialnego podejścia do środowiska.

Absolwenci kierunku Budownictwo (tab. 5) odgrywają kluczową rolę w rozwoju sektora budowlanego, stanowią istotne ogniwo pomiędzy środowiskiem akademickim a praktyką inżynierską. Wysoki poziom przygotowania zawodowego sprawia, że są oni cenionymi specjalistami w kraju oraz na rynkach międzynarodowych.

**Tabela 5.** Liczba absolwentów studiów stacjonarnych na Wydziale Inżynierii Lądowej PW

|                                  | 2021/2022 | 2022/2023 | 2023/2024 | 2024/2025 |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Studia I stopnia (inżynierskie)  | 123       | 117       | 117       | 139       |
| Studia II stopnia (magisterskie) | 115       | 95        | 103       | 104       |

Powyższe dane potwierdzają zdolność wydziału do systematycznego zasilania rynku pracy wykwalifikowaną kadrą inżynierów i magistrów inżynierów budownictwa, odpowiadając na zapotrzebowanie gospodarki. Absolwenci zdobywają również podstawy do podjęcia pracy badawczej i naukowej w wyższych uczelniach i instytucjach badawczo-naukowych.

# U progu 40-lecia Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych

Olimpiada Wiedzy i Umiejętności Budowlanych jest przedsięwzięciem edukacyjnym, mającym na celu podnoszenie rangi i jakości średniego kształcenia zawodowego w powiązaniu z zapotrzebowaniem na wysoko wykwalifikowane kadry dla budownictwa jako gałęzi gospodarki narodowej.

Kontynuuje ona tradycję organizowanego od 1987 roku w szkołach budowlanych Turnieju Wiedzy i Umiejętności Budowlanych. Zbliżający się jubileusz olimpiady z dumą prezentuje się na tle tegorocznych obchodów 200-lecia Politechniki Warszawskiej, która jest organizatorem instytucjonalnym OWiUB i zapewnia jej poziom merytoryczny poczynając od 1993 r. Przez pierwsze 5 lat opiekę merytoryczną sprawowała Politechnika Śląska.

Powołanie olimpiady było inicjatywą związanego z kształceniem kadr dla budownictwa środowiska śląskiego. Przygotowanie tego przedsięwzięcia edukacyjnego trwało kilka lat. Proces pilotażowy obejmujący przede wszystkim zagadnienia treści programowych, jak i metodologię oceny prac uczniów przygotowali i przeprowadzili pracownicy Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach wykorzystując w tym celu Turniej Wiedzy i Umiejętności Budowlanych „Złota Kielnia”. Po stwierdzeniu, że konkurs spełnia wymagania określone w rozporządzeniach ministra oświaty i wychowania w sprawie olimpiad przedmiotowych oraz olimpiad wiedzy i umiejętności zawodowych stało się możliwe powołanie 8 grudnia 1987 roku Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych. Aktu powołania dokonali wspólnie: minister gospodarki przestrzennej i budownictwa oraz ówczesna organizacja młodzieżowa ZSMP dysponująca w całym kraju strukturami niezbędnymi do organizacji ogólnopolskiego przedsięwzięcia, w dodatku skierowanego do młodzieży. W skład pierwszego Komitetu Głównego OWiUB, powołanego na 5-letnią kadencję w porozumieniu z ministrem edukacji narodowej, weszło sześciu pracowników naukowo-dydaktycznych Politechniki Śląskiej i jeden Politechniki Poznańskiej. Na początku lat 90. ubiegłego wieku



Zawody finałowe XXXVI OWiUB w Małej Auli Politechniki Warszawskiej

do składu Komitetu Głównego dołączyły dwie osoby z Politechniki Warszawskiej (dr inż. Anna Jankowska i dr inż. Wiesław Rudolf) oraz po jednej z Politechnik: Krakowskiej, Rzeszowskiej, Gdańskiej i Lubelskiej.

Politechnika Warszawska posiada wieloletnie doświadczenie w organizacji Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych jako instytucja i poprzez swoich pracowników oraz jako uczelnia publiczna prowadząca działalność naukowo-dydaktyczną gwarantuje niezbędne wsparcie organizacyjno-logistyczne i zasoby lokalowo-sprzętowe w swoich obiektach. Współpraca merytoryczna Rady Programowej Olimpiady, w której skład wchodzi obecnie sześć osób z Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej – prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, prof. dr hab. inż. Elżbieta Szmigiera, dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek, dr inż. Piotr Knyziak, dr inż. Anna Jankowska, dr inż. Maria Włodarczyk oraz po jednej z Politechnik: Gdańskiej – dr hab. inż. Marcin Kujawa, prof. PG, Opolskiej – dr hab. inż. Andrzej Marynowicz, prof. PO, Krakowskiej – dr inż. Marcin Radoń, Rzeszowskiej – prof. dr hab. inż. Lech Lichołai, Łódzkiej – dr inż. Tomasz Waśniewski, Białostockiej – prof. dr hab. inż. Jolanta Prusiel, prof. PB i Śląskiej – dr inż. Piotr Szczepaniak z wiodącymi szkołami i nauczycielami zaowocowała wypracowaniem takiej koncepcji szerokiego i dobrze zharmonizowanego ujęcia wiedzy zawodowej z dziedziny budownictwa i technicznych zastosowań matematyki, fizyki i chemii na poziomie średnim oraz metodyki pracy z uczniami zdolnymi, że osiągnięte w olimpiadzie wyniki są uwzględniane w procesie rekrutacji nie tylko na politechnikach, ale i na innych uczelniach publicznych. W związanych z olimpiadą środowiskach powstały programy nauczania i podręczniki. Zakres programowy Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych wynika z treści podstaw programowych kształcenia w zawodach szkolnictwa branży budowlanej i ogólnych celów organizacji olimpiad zapisanych art. 22 ust. 8 ustawy o systemie oświaty. Zgodność programu olimpiady z podstawami programowymi jest od lat potwierdzana przez ministerstwo umieszczaniem OWiUB w wykazach olimpiad tematycznych związanych z wybraną dziedziną wiedzy, uprawniających do uzyskania zwolnień z części pisemnej egzaminu zawodowego w obszarze zawodów budowlanych. Ponadto kontynuowana od wielu lat współpraca organizatorów z pracodawcami stanowi gwarancję dostosowania tematyki zawodów do wdrażanych ogólnych celów i zadań kształcenia w zawodach szkolnictwa branżowego. Tematyka zawodów obejmuje wszystkie problemy ujęte w podstawie

programowej kształcenia zawodowego na poziomie technikum i szkół branżowych II stopnia, a zakres treści tematów zawodów uwzględnia sprawdzenie wiedzy i umiejętności oraz kompetencji personalnych i społecznych, których uczący się nabywa w procesie kształcenia zawodowego, opisanych zgodnie z ideą europejskich ram kwalifikacji. Odpowiedni poziom wiedzy ogólnej powiązanej z wiedzą zawodową przyczynia się do podnoszenia poziomu umiejętności zawodowych absolwentów szkół prowadzących kształcenie zawodowe, a tym samym zapewnia im możliwość sprostanienia wyzwaniom zmieniającego się rynku pracy. Olimpiada włącza się w nurt indywidualizacji procesu nauczania przy zachowaniu wysokich standardów co do oczekiwanych efektów nauczania.

Krąg podmiotów bezpośrednio związanych z OWiUB, a więc szkoły zawodowe, organizacje branżowe, wspierające olimpiadę firmy budowlane i politechniki łączy staranie o to, aby zawód budowniczego na każdym szczeblu struktury zawodowej uprawiany był zgodnie z dobrymi zasadami profesjonalizmu i odpowiedzialności. Trójstopniowy system zawodów o klarownych, stabilnych regułach zewnętrznego pomiaru osiągnięć edukacyjnych stwarza pole rywalizacji dla uczniów z całej Polski. Program merytoryczny olimpiady budowany jest w myśl idei równoważenia intelektualnej sprawności i wykształcenia ogólnego z wiedzą techniczną z dziedziny budownictwa. Tematy sprawdzianów zewnętrznych (łącznie 9 godzin pracy uczestnika) każdego roku dotyczą wszystkich aspektów procesu inwestycyjnego, od architektury przez materiały budowlane, konstrukcje, technologie i procesy realizacyjne na zagadnieniach ekonomicznych i prawnych kończąc.

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej i osoby związane z OWiUB uczestniczyły przed laty aktywnie w staraniach o zaniechanie prób likwidacji średniego kształcenia zawodowego, co doprowadziłoby do powstania dysproporcji

kadrowych i luki pokoleniowej w wielu sektorach gospodarki. Pozytywne kariery uczelniane i zawodowe laureatów Olimpiady okazały się ważnym argumentem na rzecz zachowania średnich szkół technicznych jako służących realnie wyrównywaniu szans edukacyjnych młodzieży przez otwieranie zróżnicowanych ścieżek edukacyjnych i zawodowych. Organizatorzy olimpiad uczniowskich, przedmiotowych i zawodowych byli tym środowiskiem, w którym idea konieczności wyłaniania i kształcenia elit w różnych środowiskach, z których czerpią i które wzbogacają, zawsze była żywa. Olimpiada łączy rywalizację ze współpracą środowiska nauczycieli i dyrektorów szkół zainteresowanych jakością kształcenia i wychowania jako dobrem samym w sobie. Organizacja zawodów pomyślana jest tak, aby były one także spotkaniem młodzieży i nauczycieli z całego kraju, co często owocuje trwałymi kontaktami.

OWiUB niejednokrotnie wiąże ludzi na stałe. Wybitni nauczyciele i wychowawcy często sięgają z uczniami po tytuły laureatów. Od wielu lat przykładem takich postaw są: Tomasz Wardenga z Zespołu Szkół Technicznych w Wodzisławiu Śląskim, Mateusz Kieryło z Centrum Kształcenia Zawodowego i Ustawicznego Nr 1 „Budowlanka” w Zielonej Górze, Marek Hauke z Zespołu Szkół Budowlanych im. Jurija Gagarina w Bydgoszczy, Jacek Kułaga z Zespołu Szkół Budowlanych w Tarnowie, Jerzy Szczubiał z Zespołu Szkół Technicznych i Ogólnokształcących im. Kazimierza Gzowskiego w Opolu, Lucyna Nowak z Zespołu Szkół Techniczno-Ekonomicznych im. Mikołaja Reja w Myślenicach, Agnieszka Sujeta z Zespołu Szkół Budowlano-Geodezyjnych im. Stefana Władysława Bryły w Białymstoku, Joanna Sachs z Zespołu Szkół Budowlanych im. Generała Stanisława Maczka w Bielsku-Białej, Beata Królikowska z Zespołu Szkół Ponadpodstawowych im. Stanisława Staszica w Wieruszowie, Anna Winkler z Zespołu Szkół Budowlanych w Pile, Paweł Marek z Zespołu Szkół Ogólnokształcących i Zawodowych im. ks. prof. Józefa Tischnera w Limanowej, Mar

ta Potępa z Zespołu Szkół Architektoniczno-Budowlanych w Krakowie, Ewa Majewska z Zespołu Szkół Budowlanych im. dr. Władysława Matlakowskiego w Zakopanem, Magdalena Kozak-Pokrywka z Zespołu Szkół Rolniczo-Budowlanych im. „Synów Pułku” w Lesznie, Krzysztof Szczygiał z Centrum Kształcenia Zawodowego i Ustawicznego w Andrychowie, Andrzej Kuc z Centrum Kształcenia Zawodowego i Ustawicznego Nr 1 w Raciborzu. Dobrowolnie często jeszcze przed rozpoczęciem lekcji lub po lekcjach



Uczestnicy Finału Centralnego XXXVI Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych podczas Gali Finałowej w Sali pod Kopułą w gmachu Ministerstwa Rozwoju i Technologii w Warszawie, 21.04.2023 r.

ze swoimi podopiecznymi pracują o wiele więcej od innych, żeby odnieść sukces w olimpiadzie. Proces przygotowywania do olimpiady dotyczy nie tylko ucznia, ale także nauczyciela, który przy tej okazji nabywa doświadczenie, a często również zdobywa wiedzę. Nasza edukacja cierpi na niedobór nauczycieli z pasją, czy w ogóle niedobór nauczycieli kształcenia zawodowego i brakuje także klarownego systemu nagradzania i honorowania tych, którzy wyróżniają się, np. doprowadzając ucznia do tytułu laureata lub finalisty. Wielu dawnych olimpijczyków wspiera organizację zawodów okręgowych i centralnych. W tegorocznym Finale Centralnym gośćmi specjalnymi byli laureaci I miejsca z lat 2023–2025 – Aleksander Łepski z Poznania i Karol Gęsty z Wodzisławia Śląskiego. Pasja do Olimpiady przechodzi też na następne pokolenie – przykładem synowie inicjatorów Olimpiady, mgr inż. Michał Lulis i mgr inż. Milan Sternik, którzy są członkami komitetów okręgowych lub sponsorami odpowiednio w Warszawie i Bytomiu.

Kolejne edycje zawodów umożliwią dalszą konfrontację wypracowywanych w różnych szkołach rezultatów i zróżnicowanych metod pracy z uczniami zdolnymi, służą dokonaniu zewnętrznego pomiaru osiągnięć edukacyjnych, są okazją do inspirujących spotkań nauczycieli i uczniów z różnych ośrodków, sprzyjają wymianie doświadczeń, tworzeniu więzi środowiskowych wokół problemów kształtowania postaw uczniów i ich stosunku do pracy oraz doskonaleniu warsztatu zawodowego nauczycieli. Etapy centralne oprócz wartości dydaktyczno-wychowawczych stanowią wspianą okazję do promocji kolejnych społeczności lokalnych, szkół i regionów oraz firm współpracujących ze szkołami – gospodarzami zawodów.

Olimpijska rywalizacja uczniów skupia partnerów społecznych autentycznie zainteresowanych zawodem budowniczego: szkoły zawodowe, uczelnie techniczne, władze samorządowe, pracodawców i sponsorów z branży budowlanej. Cechą charakterystyczną OWiUB są silne i trwałe związki ze środowiskiem zawodowym. Puchar dla najlepszej szkoły w finale funduje Prezes Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa. Stałymi partnerami instytucjonalnymi przy organizacji OWiUB, oprócz szkół są przede wszystkim uczelnie wyższe (politechniki) oraz sponsorzy (firmy branży budowlanej), a zwłaszcza tzw. Sponsorzy Generalni. Uczelnie wspomagają prace jury, często ponoszą ciężar organizacyjny zawodów okręgowych lub współorganizują zawody centralne. Dotychczas wsparcie dla olimpiady gwarantuje siedmiu Sponsorów Generalnych z branży budowlanej, poza PIIB są to: Stowarzyszenie Producentów Cementu, FAKRO Sp. z o.o., PPG Deco Polska Sp. z o.o. Akademia Techniczna, ERBUD S.A., BUDIMEX S.A., PETRALANA S.A. Zainteresowane wsparciem OWiUB na szczeblu regionalnym są kolejne firmy z branży budowlanej. Sponsorzy Generalni zapewniają wsparcie finansowe i organizacyjne olimpiadzie. Organizacja OWiUB jest objęta formalnym patronatem zawodowym samorządu budowlanego – Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa,

jak również honorowym patronatem Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa. Oprócz wymienionych partnerów głównych OWiUB, corocznie partnerami poszczególnych etapów zawodów są również przedstawiciele władz samorządowych, sfer gospodarczych i osób cieszących się społecznym autorytetem wśród lokalnych społeczności. Tradycję, prestiż i znaczenie OWiUB podkreśla zaangażowanie i udział w organizacji laureatów poprzednich edycji. W dniach 20–22 kwietnia 2026 r. w Poznaniu w Zespole Szkół Budownictwa Nr 1 i na terenie Politechniki Poznańskiej odbył się XXXIX Finał Centralny OWiUB. Finał był ukoronowaniem ciężkiej pracy w roku szkolnym 2025/2026. W trójstopniowych ogólnopolskich zawodach wzięło udział 3 317 uczestników (wzrost o 14% w porównaniu do XXXVIII edycji) z 147 szkół. Towarzyszyli im opiekunowie, rzesza organizatorów i współorganizatorów, w tym sponsorów i innych podmiotów wspierających i życzliwie nastawionym do przedsięwzięcia na wszystkich etapach. Ostatecznie do zawodów okręgowych w 12 miejscach w kraju została zakwalifikowana rekordowa liczba uczestników – 761 osób (wzrost ok. 7% w porównaniu do poprzedniej edycji). Zawody zostały sprawnie przeprowadzone pod bezpośrednim nadzorem 12 pełnomocników Komitetu Głównego OWiUB. W bieżącej edycji funkcje te sprawowali: Nysa – Ryszard Świetlikowski, Bydgoszcz – Magdalena Popielewska, Lublin – Grażyna Kubuj-Belz, Łódź – Elżbieta Kuskowska, Kraków – Marta Potępa, Warszawa – Grażyna Grabska, Rzeszów – Barbara Rusinek, Białystok – Stanisława Krawczuk, Gdańsk – Magdalena Pytka-Leśniak, Bytom – Anna Hyla, Zielona Góra – Małgorzata Ragieli, Stargard – Bartłomiej Majkowski. Finaliści zaprezentowali wysoki poziom wiedzy i umiejętności. Pierwszy raz w historii olimpiady zawody centralne wygrała uczennica i uzyskała bardzo dobry wynik – 87 pkt. Gospodarze Finału Zespół Szkół Budownictwa Nr 1 na czele z dyrektorem Krzysztofem Kubiakiem w perfekcyjny sposób wykonali wszystkie zadania, jakich wymagała organizacja skomplikowanej logistycznie imprezy, a gościnność i życzliwość społeczności szkolnej sięgnęła najwyższego poziomu. Przed organizatorami następnych Finałów Centralnych poprzeczka została zawieszona bardzo wysoko.

Zawody centralne (III stopnia) organizuje się w ramach Finału Centralnego. Do zawodów finałowych zakwalifikowano 80 uczestników zawodów okręgowych i w zawodach uczestniczyło 80 uczniów. Uczestnicy opracowywali tematy prac konkursowych na arkuszach dostarczonych przez Radę Programową Komitetu Głównego OWiUB. W zawodach centralnych można było zdobyć max. 100 punktów. Prace oceniał zespół jury Zawodów Centralnych powołany ze składu Rady Programowej Komitetu Głównego. Prace były oceniane z dokładnością do 0,5 pkt. W wyniku oceny dokonanej przez jury pracom oznaczonym godłami przypisano liczbę punktów uszeregowanych według kryteriów w kolejności:

- liczba uzyskanych punktów,
- liczba zadań oceniona na poziomie maksimum dla danego zadania,



Uroczystość zakończenia XXXIX OWiUB w Poznaniu, 22.04.2026 r.

- mniejsza liczba zadań oceniona na minimalną liczbę punktów,
- liczba zadań o liczbie punktów 0,5 i 1.

W wyniku zastosowanej procedury ustalono zajęte miejsca przez laureatów (50 i więcej pkt.) i pozostałych uczestników. W XXXIX edycji OWiUB 45 uczestników uzyskało tytuły laureata i w sumie zgodnie z regulaminem olimpiady 34 – tytuły finalisty (40 i więcej pkt., uwzględniając także wyniki zawodów okręgowych). Po ustaleniu kolejności prac nastąpiło ich odtajnienie.

Dziekan Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej od 11 lat wyróżnia zdobywców trzech pierwszych miejsc specjalnymi medalami laureata (złotym, srebrnym i brązowym) z limitowanej serii – w 2026 r. byli to:

- laureat I miejsca – Małgorzata Belica z Centrum Kształcenia Zawodowego i Ustawicznego Nr 1 „Budowlanka” w Zielonej Górze,
- laureat II miejsca – Michał Korytko z Centrum Kształcenia Zawodowego i Ustawicznego Nr 1 „Budowlanka” w Zielonej Górze,
- laureat III miejsca – Tobiasz Solarz z Zespołu Szkół Budowlanych we Tarnowie.

Następnie ustalono kolejność szkół (ranking) według regulaminu OWiUB.

Puchar Prezesa Krajowej Rady Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa za uzyskanie I miejsca w rankingu szkół w Finale Centralnym zdobył Zespół Szkół Budowlanych im. Jurija



Zwycięzcy trzech pierwszych miejsc w 2026 r.

Gagarina w Bydgoszczy. Za uzyskanie II miejsca w rankingu szkół przyznano Puchar Wielkopolskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa dla Zespołu Szkół Technicznych w Wodzisławiu Śląskim, a za uzyskanie III miejsca w rankingu szkół przyznano Puchar Wielkopolskiej Izby Rzemieśniczej. Laureatem III miejsca zostało Centrum Kształcenia Zawodowego i Ustawicznego Nr 1 „Budowlanka” w Zielonej Górze. Siedmiu kolejnym szkołom w rankingu jury przyznało dyplomy za zajęte miejsca.

Jury XXXIX Finału Centralnego OWiUB wyłoniło najlepszych opiekunów wg kryterium liczby laureatów i zajętych przez nich miejsc w zawodach centralnych. Trzech pierwszych opiekunów w rankingu zostało wyróżnionych odpowiednio pucharami: złotym, srebrnym i brązowym przewodniczącej Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa. Wyróżnienia otrzymali:

- Marek Hauke – Zespół Szkół Budowlanych im. Jurija Gagarina w Bydgoszczy – 9 laureatów w FC XXXIX OWiUB,
- Tomasz Wardenga – Zespół Szkół Technicznych w Wodzisławiu Śląskim – 6 laureatów w FC XXXIX OWiUB,
- Mateusz Kieryło – Centrum Kształcenia Zawodowego i Ustawicznego Nr 1 „Budowlanka” w Zielonej Górze – 5 laureatów w FC XXXIX OWiUB.

Według danych statystycznych przez 39 lat w zawodach szkolnych Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych wzięło udział 136 070 uczniów, w zawodach okręgowych – 23 430, a w zawodach centralnych 2955. Spośród startujących 1193 nadano tytuły laureata i 1126 – tytuły finalisty. XXXIX edycja OWiUB była pierwszą w ramach umowy zawartej przez Politechnikę Warszawską Wydział Inżynierii Lądowej z Ministrem Edukacji na realizację zadania z zakresu organizacji i przeprowadzenia w latach szkolnych 2025/2026, 2026/2027, 2027/2028 turniejów i olimpiad tematycznych związanych z wybraną dziedziną wiedzy. Przed rokiem Politechnika Warszawska wzięła udział w otwartym konkursie Ministerstwa Edukacji Narodowej mającym na celu wyłonienie najkorzystniejszych ofert. Wygraliśmy konkurs w dziedzinie wiedzy budowlanej, pokonując organizatorów Turnieju Budowlanego „Złota Kielnia”, Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Instalacyjnych oraz Olimpiady „Buduj z Pasją”. Nasza oferta, jako jedyna spośród 27 złożonych we wszystkich dziedzinach, uzyskała maksymalną liczbę 40 pkt. w ocenie konkursowej. Tym samym przed Uczelnią stanęła perspektywa organizacji kolejnych trzech edycji Olimpiady Wiedzy i Umiejętności Budowlanych (XXXIX, XL, XLI).

**Andrzej Oniszcuk**  
Wiceprzewodniczący,  
Kierownik Organizacyjny OWiUB

# Sukcesy interdyscyplinarnych zespołów studentów Politechniki Warszawskiej w konkursie SPB – wzorowa współpraca architektów i konstruktorów

dr inż. Piotr Knyziak (ORCID: 0000-0003-1037-8659), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

Współczesne budownictwo wymaga nie tylko wysokich kompetencji technicznych, lecz przede wszystkim umiejętności pracy zespołowej na styku różnych dyscyplin. Szczególnie wyraźnie widać to w działalności studentów Politechniki Warszawskiej, którzy podejmują ambitne, wielowątkowe zadania projektowe, wykraczające poza standardowy program studiów. Jednym z najciekawszych przykładów takiej aktywności są podejmowane w ostatnich latach działania interdyscyplinarnych zespołów studentów Wydziału Architektury (WA) oraz Wydziału Inżynierii Lądowej (WIL), realizowane w ramach konkursu „Dwa oblicza, jedna przyszłość betonu komórkowego i prefabrykacji betonowej”, organizowanego przez Stowarzyszenie Producentów Betonów przy wsparciu medialnym czasopisma „Builder”.

Choć formalnie jest to konkurs, w praktyce stanowi przede wszystkim platformę intensywnego rozwoju młodych projektantów. Studenci pracują w kilkusobowych zespołach, w których naturalnie ścierają się różne sposoby myślenia o przestrzeni i konstrukcji. To właśnie w tej współpracy, wymagającej dialogu, kompromisu i wzajemnego zrozumienia, kształtują się kompetencje kluczowe dla przyszłej praktyki zawodowej. Istotnym elementem tego procesu jest wsparcie opiekunów, pracowników naukowych obu wydziałów, którzy pełnią rolę mentorów. Ich udział nie ogranicza się do konsultacji technicznych, lecz obejmuje również pomoc w organizacji pracy zespołu, ukierunkowaniu poszukiwań projektowych oraz krytycznej ocenie przyjmowanych rozwiązań. Dzięki temu studenci uczą się podejmowania świadomych decyzji projektowych i odpowiedzialności za ich konsekwencje.

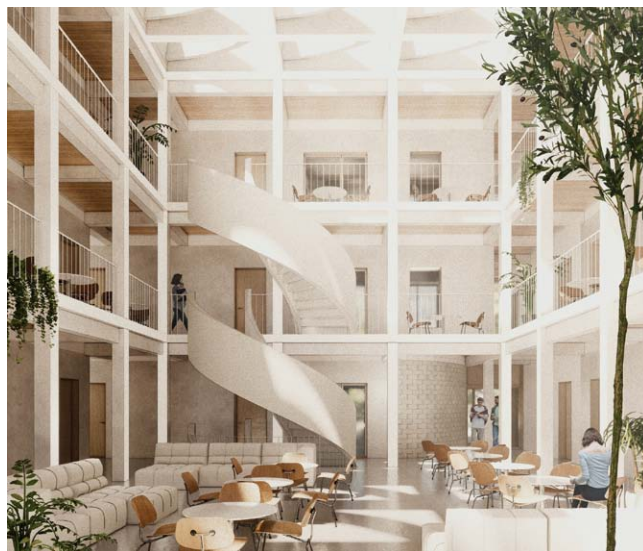
Równoległe dużą rolę odgrywa kontakt z praktyką inżynierską. Uczestnicy biorą udział w dodatkowych wykładach i warsztatach prowadzonych przez przedstawicieli firm wykonawczych i producentów materiałów budowlanych, związanych m.in. ze Stowarzyszeniem Producentów Betonów. Poznają aktualnie stosowane technologie, rozwiązania materiałowe oraz realia procesu inwestycyjnego – od produkcji prefabrykatów po ich montaż na budowie. Pozwała to

na konfrontację koncepcji projektowych z rzeczywistymi uwarunkowaniami wykonawstwa. Niemniej istotne są relacje nawiązywane zarówno z przedstawicielami branży, jak i studentami innych uczelni, które w przyszłości mogą przekształcić się w trwałe kontakty zawodowe.

Osiągnięcia zespołów projektowych PW stanowią przykład współpracy między przyszłymi architektami i konstruktorami oraz dowód na wysoki poziom kształcenia projektowego i technicznego na obydwu wydziałach Politechniki Warszawskiej oraz przygotowania studentów również w zakresie praktycznym.

## 2. Pierwsza edycja – dojrzałość projektowa i zwycięstwo

W pierwszej edycji szczególnie wyraźnie zaznaczył się potencjał zespołu studenckiego naszej uczelni. Projekt „Siedlisko studenckie przy Polu Mokotowskim”, opracowany przez Martę Nawrocką (WA), Mikołaja Niewęgłowskiego (WA), Rafała Konerta (WIL) i Artura Fushteia (WIL), został najwyższej oceniony przez jury i finalnie zdobył pierwsze miejsce w Konkursie. Było to jednak nie tylko zwycięstwo w sensie



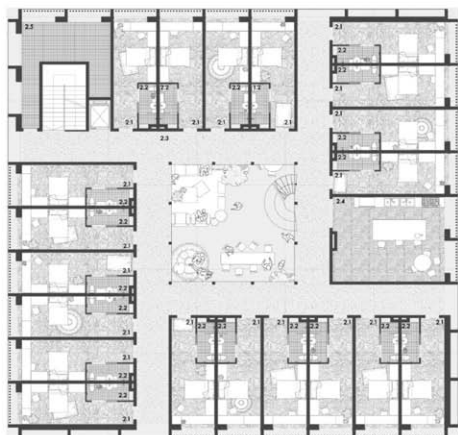
Rys. 1. Siedlisko studenckie – wizualizacja wnętrza



**Rys. 2.** Siedlisko studenckie – wizualizacja budynku

formalnym, ale przede wszystkim dowód dojrzałości projektowej młodego zespołu.

Autorzy zaproponowali rozwiązanie, które łączyło wysoką jakość architektoniczną z racjonalnymi założeniami konstrukcyjnymi. Umiejętne wykorzystanie prefabrykacji betonowej



**Rys. 3.** Siedlisko studenckie – dopasowanie wizji architektonicznej i konstrukcyjnej

oraz elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) pozwoliło na stworzenie koncepcji spójnej technologicznie i odpowiadającej współczesnym wymaganiom środowiskowym. Kluczowe znaczenie miała tu efektywna współpraca – studenci potrafili przełożyć różnice kompetencyjne na wartość projektu, zamiast traktować je jako ograniczenie.

### 3. Druga edycja – rozwój kompetencji i nowe formy prezentacji

Druga edycja pokazała, że zespoły studenckie PW nie tylko utrzymują wysoki poziom, ale także dynamicznie rozwijają swoje kompetencje. Projekt „Serce Żerania”, autorstwa Michała Sierzęgi (WA), Jakuba Kaczmarczyka (WA), Mariusza Majchrzaka (WIL) i Marka Korycińskiego (WIL), został doceniony przez jury, a jednocześnie zwrócił uwagę środowiska architektonicznego.



**Rys. 4.** „Serce Żerania” – wizualizacja od strony kanału Żerańskiego

Na szczególne podkreślenie zasługuje sposób prezentacji koncepcji. Studenci przygotowali kompleksową wizualizację w formie filmu, jako jedyny zespół w tej edycji ([www.youtube.com/watch?v=Sb4aQK07G3A](http://www.youtube.com/watch?v=Sb4aQK07G3A)). Było to nie tylko narzędzie atrakcyjnej prezentacji, lecz przede wszystkim dowód świadomego wykorzystania nowoczesnych narzędzi projektowych, w tym modelowania BIM i wizualizacji 3D. Takie podejście pozwoliło na pełniejsze ukazanie idei projektowej oraz

sposobu funkcjonowania zaproponowanego obiektu w kontekście przestrzennym i użytkowym. Film stanowił nie tylko atrakcyjne uzupełnienie plansz projektowych, ale także dowód na duże kompetencje studentów w zakresie narzędzi cyfrowych. Warto podkreślić, że przygotowanie takiej formy prezentacji wymagało dodatkowego nakładu pracy i zaangażowania, co świadczy o wysokiej motywacji zespołu oraz

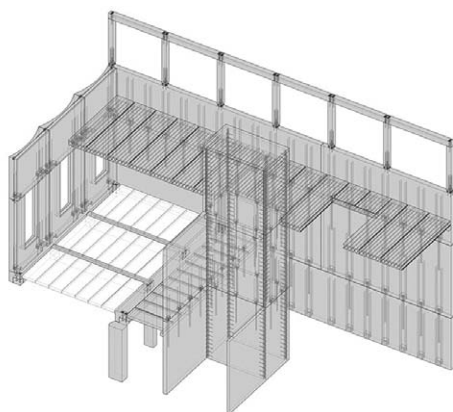
jego ambicjach wykraczających poza standardowe wymagania konkursowe.

Projekt spotkał się również z zainteresowaniem mediów branżowych, co potwierdza jego wysoki poziom merytoryczny



**Rys. 5.** „Serce Żerania” – wizualizacja od strony dziedzińca wewnętrznego

**Rys. 6.** „Serce Żerania”  
– koncepcja fragmentu konstrukcji



i aktualność podejmowanej problematyki. Koncepcję projektową zespołu PW w drugiej edycji na swych łamach zaprezentowały czasopisma „Architektura-Murator” oraz „Architektura i Biznes”. Studenci udzielili również wywiadu w Radio dla Ciebie. Dla studentów był to ważny etap budowania własnej tożsamości zawodowej.

#### 4. Trzecia edycja – kontynuacja i rosnące ambicje

W trwającej obecnie trzeciej edycji konkursu zatytułowanej „OSIEDLE 2.0 -EFEKTYWNIE.TRWALE.PIĘKNIE” udział bierze kolejny zespół studentów PW: Martyna Kotulek (WA), Rafał Kolibski (WIL) i Mateusz Gierszewski (WIL). Po raz kolejny widoczne jest rosnące doświadczenie i świadomość projektu jego uczestników.

Wykłady inauguracyjne odbyły się na Wydziale Inżynierii Lądowej PW, co dodatkowo podkreśliło rolę wydziału jako jednego z kluczowych ośrodków edukacyjnych w zakresie nowoczesnych technologii budowlanych. Studenci mieli okazję wysłuchać ekspertów z branży prefabrykacji, ABK oraz projektowania architektonicznego: przedstawiciele JEMS Architekci, H+H Polska, PFEIFER Polska, MC-Bauchemie. Tegoroczne zadanie kładzie większy nacisk na aspekty środowiskowe, w tym możliwość ponownego wykorzystania elementów prefabrykowanych. Wymaga to od studentów nie tylko kreatywności, ale również umiejętności myślenia w kategoriach cyklu życia obiektu i gospodarki obiegu zamkniętego. Dotychczasowe rezultaty prac wskazują, że ta edycja również zaowocuje rozwiązaniami wyróżniającymi się na tle innych zespołów.

#### 5. Proces kształcenia poprzez działanie konkursowe

Udział w kolejnych edycjach ma charakter długofalowy i wymaga systematycznej pracy. Projekty powstają w cyklu rocznym, obejmującym zarówno etap zdobywania wiedzy, jak i intensywnej pracy projektowej. Studenci uczą się planowania, podziału zadań oraz konsekwentnego rozwijania koncepcji.

Szczególne znaczenie ma tu możliwość praktycznego zastosowania wiedzy zdobytej na studiach. Połączenie prefabrykowanej konstrukcji żelbetowych z elementami z ABK staje się dla studentów nie tylko zagadnieniem teoretycznym, ale realnym narzędziem projektowym. Dzięki temu powstają koncepcje nie tylko atrakcyjne wizualnie, lecz również technicznie uzasadnione i możliwe do realizacji.

Nieocenioną rolę w procesie tworzenia koncepcji odgrywają opiekunowie, nauczyciele akademicy Politechniki Warszawskiej. Ich wsparcie obejmuje zarówno kwestie merytoryczne, jak i organizacyjne. Pomagają studentom w efektywnym planowaniu pracy oraz kreatywnym rozwiązywaniu problemów projektowych. W pierwszej edycji konkursu opiekunami zespołu byli dr inż. Anna Tofiluk i dr inż. Piotr Knyziak. W drugiej edycji opiekunów z pierwszego etapu wsparł wiedzą z realizacji praktycznych mgr inż. arch. Rafał Bujnowski. W trzeciej edycji konkursu opiekunami zespołu są prof. dr hab. inż. arch. Elżbieta Ryńska i ponownie dr inż. Piotr Knyziak.

#### 6. Interdyscyplinarność jako realna kompetencja

Doświadczenia zespołów studenckich PW potwierdzają, że interdyscyplinarność nie jest jedynie postulatem, lecz konkretną umiejętnością, którą można i należy rozwijać. Studenci Wydziału Architektury odpowiadają przede wszystkim za koncepcję przestrzenną i estetyczną, podczas gdy studenci Wydziału Inżynierii Lądowej koncentrują się na aspektach konstrukcyjnych i technologicznych. Taka synergia pozwala na tworzenie projektów kompleksowych, uwzględniających wszystkie kluczowe aspekty procesu inwestycyjnego. W praktyce oznacza to bardziej świadome projektowanie, uwzględniające zarówno aspekty estetyczne, jak i konstrukcyjne, technologiczne oraz środowiskowe. Taka postawa przekłada się bezpośrednio na jakość powstających koncepcji. Wspólna praca nad projektem uczy komunikacji, kompromisu oraz odpowiedzialności za podejmowane decyzje, kompetencji niezwykle istotnych w przyszłej pracy zawodowej.

#### 7. Podsumowanie

Aktywność studentów Politechniki Warszawskiej w kolejnych edycjach konkursu organizowanego przez Stowarzyszenie Producentów Betonów pokazuje, że zespoły projektowe studentów PW są zdolne do tworzenia rozwiązań na wysokim poziomie merytorycznym i technicznym. Zwycięstwo w pierwszej edycji, wysoce zaawansowana technicznie forma prezentacji w drugiej oraz ambitny udział w trzeciej to nie tylko sukcesy konkursowe, lecz przede wszystkim efekt konsekwentnej pracy, zaangażowania i umiejętności współpracy. Największą wartością tego doświadczenia są jednak nie same nagrody, lecz rozwój kompetencji studentów, kompetencji zarówno technicznych, jak i społecznych. To właśnie one będą decydować o jakości przyszłej praktyki zawodowej młodych architektów i inżynierów.

# Międzywydziałowy projekt interdyscyplinarny BIM – czyli Project-Based Learning w dydaktyce Wydziału Inżynierii Lądowej i Politechniki Warszawskiej

Interfaculty interdisciplinary project BIM – i.e. Project-Based Learning in the teaching of the Faculty of Civil Engineering and the Warsaw University of Technology

dr inż. Ireneusz Czmocho (ORCID: 0000-0002-5818-3781), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7430

**Streszczenie:** Międzywydziałowy interdyscyplinarny projekt BIM jest programem innowacyjnym nie tylko w ramach Politechniki Warszawskiej, ale także w skali krajowej. W latach 2017–2026 zrealizowano dziewięć edycji tego przedmiotu, w których wzięło udział ponad 300 studentów z pięciu wydziałów PW. Międzywydziałowe studenckie zespoły projektowe przygotowały 44 projekty o różnych funkcjach, gabarytach, liczbie użytkowników oraz lokalizacji. Artykuł dowodzi, że międzywydziałowy projekt interdyscyplinarny BIM realizowany na Politechnice Warszawskiej spełnia pięć kryteriów metodyki Project-Based Learning: 1) mpiBIM jest dostępny dla wszystkich studentów, 2) mpiBIM skłania studentów do rozwiązania bardzo ważnych problemów dla każdej z branż, 3) mpiBIM stymuluje studentów do samokształcenia, 4) realizacja zadania zależy przede wszystkim od inicjatywy studentów, 5) tematy projektowe w ramach mpiBIM są praktyczne, co wywołuje głębokie zaangażowanie studentów.

**Słowa kluczowe:** Project-Based Learning, BIM, projektowanie interdyscyplinarne, koordynacja międzybranżowa.

**Abstract:** The interfaculty, interdisciplinary BIM project is an innovative program not only within the Warsaw University of Technology but also on a national scale. Between 2017 and 2026, nine editions of this course were delivered, involving over 300 students from five faculties of the Warsaw University of Technology. Interfaculty student project teams developed 44 projects with varying functions, sizes, numbers of users, and locations. The article demonstrates that the interfaculty interdisciplinary BIM project implemented at the Warsaw University of Technology meets five criteria of the Project-Based Learning methodology: 1) the mpiBIM course is accessible to all students, 2) mpiBIM engages students in solving important problems relevant to each discipline, 3) mpiBIM encourages students to engage in self-directed learning, 4) the completion of the task depends primarily on student initiative, 5) the project topics within mpiBIM are practical, which fosters deep student engagement

**Keywords:** Project-Based Learning, BIM, interdisciplinary design, interdisciplinary coordination.

## 1. Wprowadzenie

Od wielu lat były podejmowane próby przełamania „silosowego” charakteru nauczania na wydziałach Politechniki Warszawskiej i w ramach wydziałów. Dydaktyka, w której np. przedmioty konstrukcyjne nie są zintegrowane z mechaniką budowlą, a projekt kanałów instalacyjnych nie jest powiązany z bezpieczeństwem stropów lub ścian – jest w sprzeczności z praktyką działania w budownictwie, czego doświadczają absolwenci architektury lub budownictwa, jak tylko spotkają się w biurach projektów, pracując nad rzeczywistymi zadaniami projektowymi. Studenci Wydziału Architektury przez cały okres studiów przygotowują dziesiątki projektów koncepcyjnych nowych obiektów, o różnorodnej funkcji, lokalizacji i gabarytach. Na dziewiątym lub jedenastym semestrze posiadają już rozległą wiedzę i doświadczenie w projektowaniu, w tym dotyczącą zasad mechaniki konstrukcji i zasad działania instalacji technicznych. Niestety

na etapie projektowania koncepcyjnego aspekty konstrukcyjne i instalacyjne są traktowane jako mniej ważne, które jakoś tam później można rozwiązać. Natomiast rzeczywiste projekty są interdyscyplinarne i aspekty techniczne są uwzględniane od początku projektu koncepcyjnego, poprzez projekt budowlany, aż do projektów wykonawczych.

Innym czynnikiem utrudniającym współpracę między studentami architektury i np. konstruktorami jest inne rozumienie słowa „projekt”. Studenci WIL otrzymują na samym początku zajęć projektowych konkretne zadanie (np. kształt i wymiary kratownicy), które nie wymaga fazy koncepcyjnej. Od razu koncentrują swoje działania wokół projektowania rozumianego jako „wymiarowanie”, czyli wyznaczenie ilości zbrojenia dla zadanego przekroju słupa, dobranie przekroju belki stalowej. Podobnie student WIŚ dobiera system wentylacyjny i jego trasę lub centralę wentylacyjno-klimatyzacyjną do obsługi pomieszczenia czy kompleksu pomieszczeń w gotowym projekcie architektoniczno-budowlanym.

Taka sytuacja w pewnym sensie przyzwyczajają przyszłego konstruktora lub projektanta instalacji do pełnienia jedynie funkcji usługowej wobec działań architekta. Z drugiej strony w praktyce zawodowej pozytywne lub negatywne odpowiedzi konstruktora, bazujące na obliczeniach, decydują o dalszym rozwoju projektu, gdyż architekt musi uwzględnić co jest faktycznie możliwe do zbudowania, a co wymaga dalszych poszukiwań rozwiązań projektowych akceptowanych przez niego i konstruktora. Ponadto niekonwencjonalne wizje architekta mogą stymulować konstruktora do poszukiwania początkowo nieoczywistych rozwiązań. Doświadczony konstruktor podejmuje się – w dyskusji z architektem, instalatorami, jak i inwestorem – znaleźć rozwiązania konstrukcyjne, które zapewnią techniczną realizację pomysłu architekta. Nie zawsze jest to możliwe, ale dobrze jest rozpatrzyć różne możliwości, nim padnie odpowiedź w stylu: „nie da się”. Thomas [1] definiuje pięć kryteriów, które musi spełniać przedmiot nauczania, aby mógł być godnym miana „Project-Based Learning”.

- Przedmiot z kategorii PBL jest zasadniczym, a nie peryferyjnym w stosunku do programu nauczania, więc ten przedmiot musi powstać decyzją całej instytucji, a nie tylko niektórych nauczycieli realizujących kurs na własną rękę.
- Przedmiot z kategorii PBL powinien koncentrować się na pytaniach lub problemach, które skłaniają studentów do zmagania się z centralnymi pojęciami i zasadami danej dyscypliny.
- Przedmiot z kategorii PBL powinien prowadzić studentów w kierunku konstruktywnych badań, nowa wiedza jest potrzebna do rozwiązania problemu. Tym samym studenci stają się odpowiedzialni za decyzję o samokształceniu się w celu zdobycia nowych umiejętności lub wiedzy.
- Realizacja zadania w ramach przedmiotu z kategorii PBL zależy przede wszystkim od inicjatywy studentów, a nauczyciele muszą zrezygnować z ciągłego nadzoru i pozostawić studentom pewną swobodę i autonomię w kierowaniu własną pracą.
- Zadanie w ramach przedmiotu z kategorii PBL powinno być realistyczne, a nie przypominać teoretyczne zadanie akademickie. Jeśli temat projektowy jest praktyczny, to powstanie szansa na głębokie zaangażowanie studentów.

Dalsza część artykułu dowodzi, że międzywydziałowy projekt interdyscyplinarny BIM realizowany na Politechnice Warszawskiej od 2017 r. spełnia pięć powyższych kryteriów.

## 2. Początki przedmiotu mpiBIM

W semestrze zimowym roku akademickiego 2017/2018, z inicjatywy prof. Jana Słyka, ówczesnego Dziekana Wydziału Architektury Politechniki Warszawskiej, przy aktywnym wsparciu Dziekanów Wydziału Inżynierii Lądowej, Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Wydziału Elektrycznego oraz Wydziału Zarządzania, zainaugurowano pierwszą edycję „Międzywydziałowego Interdyscyplinarnego Projektu BIM” (mpiBIM). Studenci z pięciu wyżej wymienionych wydziałów utworzyli zespoły międzywydziałowe, których zadaniem było przygotowanie interdyscyplinarnego projektu

budowlanego. Narzędziem koordynacji był cyfrowy model BIM, który umożliwia skuteczną komunikację, wczesne rozwiązywanie problemów i skuteczną koordynację międzybranżową. Głównym celem przedmiotu było rozwijanie umiejętności współpracy i komunikacji w ramach zespołu interdyscyplinarnego. Zespoły współpracowały poprzez bezpośredni kontakt, narzędzia komunikacji cyfrowej oraz konsultacje w trakcie zajęć międzywydziałowych na uczelni. W odróżnieniu od „tradycyjnego” projektowania, gdzie każda dyscyplina działa w systemie kaskadowym i jedynie wykorzystuje rozwiązania opracowane przez poprzedników, w tym przypadku wszyscy studenci aktywnie uczestniczyli w tworzeniu projektu od samego początku. Mogli nie tylko pogłębić swoją wiedzę z zakresu własnej dyscypliny, ale także poznać praktycznie pracę projektantów z innych dziedzin [2]. Międzywydziałowy interdyscyplinarny projekt BIM jest programem innowacyjnym nie tylko w ramach Politechniki Warszawskiej, ale także w skali krajowej. W latach 2017–2026 zrealizowano dziewięć edycji tego przedmiotu, w których wzięło udział ponad 300 studentów z pięciu wydziałów PW (tab. 1). Międzywydziałowe studenckie zespoły projektowe przygotowały 44 projekty (tab. 2) o różnych funkcjach, gabarytach, liczbie użytkowników oraz lokalizacji.

Tematyka prac projektowych była różnorodna, ale została dobrana, tak aby zawierała wyzwania dla studentów z pięciu różnych wydziałów.

## 3. Zespoły studenckie i uwarunkowania realizacji przedmiotu mpiBIM

Międzywydziałowe zespoły projektowe składały się ze studentów następujących wydziałów PW (co najmniej 1 student z każdego wydziału; czasami 2 lub 3): Wydział Architektury, Wydział Inżynierii Lądowej, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, obecnie Wydział Inżynierii Środowiska, Wydział Elektryczny, Wydział Zarządzania, przy czym

**Tabela 1.** Zestawienie liczby studentów – uczestników dziewięciu edycji mpiBIM

| Rok Akademicki     | WA | WIL | WIBHiS/WIŚ | WE | WZ |
|--------------------|----|-----|------------|----|----|
| 2017/2018          | 6  | 12  | 6          | 6  | 6  |
| 2018/2019          | 11 | 12  | 14         | 15 | 15 |
| 2019/2020          | 9  | 11  | 10         | 12 | 9  |
| 2020/2021          | 8  | 5   | 7          | 7  | 5  |
| 2021/2022          | 5  | 5   | 8          | 8  | 10 |
| 2022/2023          | 11 | 5   | 5          | 6  | 6  |
| 2023/2024          | 9  | 8   | 10         | –  | –  |
| 2024/2025          | 11 | 8   | 17         | –  | 12 |
| 2025/2026          | 12 | 9   | 19         | –  | 12 |
| suma dla 9. edycji | 82 | 75  | 96         | 54 | 75 |

WA – Wydział Architektury, WIL – Wydział Inżynierii Lądowej, WIBHiS/WIŚ – Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, a od 01.05.2025 r. Wydział Inżynierii Środowiska, WE – Wydział Elektryczny, WZ – Wydział Zarządzania.

**Tabela 2.** Tematy prac projektowych w poszczególnych latach

| Edycja   | Tematy prac projektowych. Często ten sam temat był opracowany przez kilka zespołów  |
|--|---|
| 1. 2017/2018   | 1. Przejście nad Al. Armii Ludowej wzdłuż ul. Rektorskiej na Pole Mokotowskie<br>2. KAMPUS + Informatorium PW/Nowa Biblioteka (2 wersje)<br>3. Centrum konferencyjne na terenie Kampus BIS przed budynkiem WEiTI (2 wersje)                               |
| 2. 2018/2019   | 1. Nowy budynek Wydziału Inżynierii Łądowej (2 wersje)<br>2. Budynek administracyjno-ogólnouczelniany w miejscu Stołówki PW<br>3. Budynek biurowy między Centrum konferencyjnym a budynek IPC<br>4. Centrum konferencyjne na wschód od nowego budynku WIL |
| 3. 2019/2020   | 1. Basen między stadionem Syrenka a klubem Stodoła (2 wersje)<br>2. Hala sportowa wielofunkcyjna (2 wersje)   |
| 4. 2020/2021   | 1. Hala widowiskowo-sportowa<br>2. Kompleks: Basen, Hala sportowa i Centrum Rehabilitacyjno-konferencyjne<br>3. Obiekt widowiskowo – szkoleniowy z wydzieloną częścią administracyjno –rehabilitacyjną  |
| 5. 2021/2022   | 1. Kampus nowych technologii/Informatorium PW/Nowa Biblioteka (3 wersje)<br>2. Centrum konferencyjne przed budynkiem WEiTI (2 wersje)   |
| 6. 2022/2023   | Wieżowiec między DS Riviera a Trasą Łazienkowska (5 wersji)   |
| 7. 2023/2024   | Budynek wysoki z salą konferencyjną między DS Riviera a Trasą Łazienkowska (5 wersji)   |
| 8. 2024/2025   | Wieżowce o mieszanej funkcji biurowo-mieszkańkowej przy ul. Grzybowskiej (6 wersji)   |
| 9. 2025/2026   | Międzywydziałowe Centrum Badań Interdyscyplinarnych na terenie kampusu BIS Politechniki Warszawskiej – zespół różnych laboratoriów, sal wykładowych i pomieszczeń towarzyszących (6 wersji)   |
| Uwagi<br>1. Edycje 4 i 5 były realizowane w trybie zdalnym w okresie pandemii<br>2. W skład zespołów projektowych wchodził jeden lub dwóch projektantów konstrukcji. |   |

z różnych względów tylko studenci trzech pierwszych wydziałów brali udział we wszystkich dziewięciu edycjach.

Zadaniem zespołów międzywydziałowych jest opracowanie projektu, zaczynając od przysłowiowej „czystej kartki”, co przede wszystkim wymaga ustalenia struktury organizacyjnej, zasad i kanałów wymiany informacji, a także stworzenia mechanizmów decyzyjnych. Zespoły pracują pod kierunkiem wykładowców z pięciu wydziałów, a od czasu do czasu wyniki ich pracy są konsultowane z ekspertami zewnętrznymi (projektantami z biur projektowych, wykonawcami robót).

Z merytorycznego punktu widzenia przedmiot mpiBIM powinien być skierowany do studentów studiów magisterskich. W dotychczasowych edycjach tylko studenci WA spełniali to kryterium, gdzie mpiBIM był realizowany jako przedmiot obowiązkowy na semestr 9 „Projektowanie architektoniczne 2” lub jako przedmiot „Interdyscyplinarny BIM” (na semestr 11 studiów jednolitych, od 2022 r.). Tematy projektowe proponowane

w ramach projektu mpiBIM wpisują się w cele WA.: „Rozwijanie umiejętności projektowania monumentalnych budynków użyteczności publicznej o złożonych funkcjach w środowisku miejskim. Rozwiązywanie problemów związanych z wysoce złożonymi funkcjami, kształtowanie przestrzeni wielokondygnacyjnych dla dużych grup ludzi, modelowanie hal o znacznych rozpiętościach i kubaturach w oparciu o prawidłowe parametry techniczne, akustyczne i oświetleniowe oraz opanowanie umiejętności tworzenia budynków o charakterystycznej formie i niepowtarzalnej, indywidualnej estetyce, odpowiedniej do lokalizacji i funkcji obiektu”. Tak postawione zadanie jest również atrakcyjne dla studentów WIL czy WIŚ.

W dotychczasowych edycjach mpiBIM uczestniczyła zmienna liczba studentów WIL, od kilku do kilkunastu, głównie studenci 7. semestru studiów inżynierskich, którzy wybrali ten przedmiot spośród przedmiotów fakultatywnych. Studentów tych można scharakteryzować następująco:

- ukończyli kurs z podstaw modelowania w programie Revit na 4. semestrze;
- opanowali podstawy programu ROBOT, za pomocą którego mogą przeprowadzać analizę statyczną i wymiarowanie konstrukcji belkowych ze stali i betonu zbrojonego;
- opanowali podstawy projektowania konstrukcji (drewnianych, stalowych, żelbetowych) zgodnie z Eurokodami; znają odpowiednie algorytmy i czasami mają dostęp do programów obliczeniowych umożliwiających szybką analizę;
- czasami posiadają szerszą wiedzę praktyczną dotyczącą korzystania z innych programów, jeśli interesują się tym tematem, działają w kołach naukowych, samodzielnie zgłębiają tę dziedzinę lub rozpoczęli pracę (w ramach praktyk) w biurze projektowym lub na placu budowy;
- dotychczasowy przebieg studiów do semestru 6 (terminowe zaliczenia, egzaminy) gwarantuje, że są dobrze przygotowani do wzięcia udziału w tak wymagającym projekcie.

Warto zauważyć, że w poprzednich edycjach uczestniczyli głównie członkowie Koła Naukowego BIMgo, czyli studenci naprawdę zainteresowani poznaniem narzędzi i procedur BIM. Na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, a od 01.05.2025 r. Wydziale Inżynierii Środowiska – mpiBIM to przedmiot fakultatywny. Każdego roku w projekcie uczestniczy od kilku do kilkunastu osób, z uwzględnieniem podziału na specjalności: wod.-kan., wentylacja i klimatyzacja. WIŚ oferuje wiele kursów, w ramach których zajęcia praktyczne, projekty lub ćwiczenia laboratoryjne odbywają się w zespołach studenckich. Zespoły składają się zazwyczaj z dwóch, maksymalnie trzech osób, a nauka odbywa się poprzez pracę grupową, obejmującą podział zadań między poszczególnych członków oraz koordynację działań w ramach zespołu.

Należy zauważyć, że zarówno na WIL i WIŚ wykładowcy i studenci są w dużej mierze przyzwyczajeni do prowadzenia zajęć w tradycyjny sposób, tzn. wykładowca przekazuje wiedzę i metody rozwiązywania problemów w sposób sekwencyjny, a studenci rozwiązują powtarzalne zadania, zgodnie z przekazaną wiedzą.

#### 4. Założenia przedprojektowe

Tematy zrealizowane dotychczas w ramach przedmiotu mpiBIM były zlokalizowane na obszarach objętych miejscowymi planami zagospodarowania przestrzennego, np. Kampus B PW, okolice Stadionu Syrenka PW, sąsiedztwo DS Riviera lub fragment ul. Grzybowskiej (tab. 2). Czasami założenia przestrzenne zostały częściowo poluzowane przez koordynatorów. Minimalny zakres określający podstawowe cechy inwestycji na proponowanej działce obejmował:

- program funkcjonalno-przestrzenny inwestycji,
- granice terenu projektowego,
- nieprzekraczalne linie zabudowy,
- liczba kondygnacji i/lub wysokość budynku,
- gęstość zabudowy dla terenu projektu,
- procentowy udział powierzchni biologicznie czynnej,
- lokalizacja wjazdu i wejścia na teren obiektu.

Na podstawie powyższych danych studenci architektury są w stanie stworzyć bryłę koncepcyjną budynku oraz przygotować wstępne rzuty kondygnacji z rozmieszczeniem podstawowych funkcji w budynku, co służy jako wytyczne do pierwszych branżowych działań projektowych. Na tym etapie pracy studenci z każdego wydziału zapoznają się ze specyfiką techniczną i z ogólnymi założeniami dla całej inwestycji.

Podstawowe obszary koordynacji międzydyscyplinarnej na etapie koncepcyjnym przedstawiono poniżej.

- Architektura – określenie wstępnych wymiarów budynku, umiejscowienie na działce i rozmieszczenie głównych funkcji użytkowych. Stworzenie modelu 3D z wykorzystaniem stref/pomieszczeń (bez uwzględnienia grubości ścian i stropów). Ustalenie podstawowego układu komunikacji poziomej i pionowej. Określenie wielkości poziomów podziemnych i wjazdów do podziemnego parkingu.
- Konstrukcja – wstępne wymiarowanie podstawowych elementów konstrukcyjnych dla założonego planu funkcjonalnego i przestrzennego oraz maksymalnych rozpiętości stropów (dla wstępnego położenia ścian i słupów lub belek). Uzgodnienie kształtu i podstawowych wymiarów konstrukcji o dużej rozpiętości.
- Systemy wentylacyjne – określenie proponowanych metod pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych (ogrzewanie i chłodzenie), określenie wstępnych rozmiarów i preferowanych lokalizacji urządzeń systemu wentylacyjnego.
- Instalacje wodno-kanalizacyjne – wytyczne dotyczące użytkowania urządzeń sanitarnych w budynku, zdefiniowanie podstawowych zasad działania systemów przeciwpożarowych i podstawowych założeń retencji wody deszczowej.
- Instalacje elektryczne – określenie preferowanych technologii pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych oraz ich interdyscyplinarne uwarunkowania. Założenie podstawowych zasad rozmieszczenia urządzeń zasilających.
- Zarządzanie – określenie trybu i organizacji pracy zespołowej. Przedstawienie podstawowych narzędzi zarządzania projektem oraz metody przygotowywania danych do oszacowania kosztów.

#### 5. Etapy pracy projektowej

Przedmiot mpiBIM jest realizowany w semestrze zimowym danego roku akademickiego. Od pierwszej edycji koordynatorzy uzgodnili wspólnie poniższy harmonogram realizacji projektu.

Etap 0: Faza przedprojektowa: Rozpoczęcie projektu i zapoznanie się z założeniami (1-2 tydzień semestru).

Etap 1: Projekt Koncepcyjny kończy się w 7. lub 8. tygodniu semestru.

Etap 2: Projekt Techniczny kończy się w 14. tygodniu semestru.

Etap 3: Publiczne prezentacje końcowe w czwartek 15. tygodnia semestru.

Prezentacje na koniec etapów 1 i 3 mają charakter wielobranżowy, z udziałem wszystkich członków zespołu projektowego. Zajęcia w ramach programu mpiBIM są podzielone na: wydziałowe i międzywydziałowe:

- wspólne zajęcia w zespołach międzywydziałowych (3–4 godz.)
- branżowe zajęcia na wydziałach (2–3 godz.)

Pomiędzy tymi zajęciami jest 2–3 dniowa przerwa, aby studenci mogli przygotować się do zajęć branżowych po spotkaniu zespołu interdyscyplinarnego. Tradycyjnie zajęcia międzywydziałowe odbywają się w czwartki w godz. 16–20 w budynku WIL, a zajęcia branżowe na wydziałach – w poniedziałki lub wtorki. Od początku głównym narzędziem pracy jest cyfrowy model BIM, który służy do prezentacji rozwiązań projektowych i ułatwia koordynację międzydyscyplinarną. Początkowo model bryłowy tworzą architekci, na podstawie wytycznych przestrzennych i funkcjonalnych. Stopniowo model bryłowy staje się modelem BIM-owym, z pomocą elementów budowlanych (stropy, słupy, ściany), które tworzą coraz bardziej szczegółowy model 3D BIM. Zasady tworzenia modeli BIM, wymiany informacji, koordynacji interdyscyplinarnej oraz weryfikacji powstałych modeli BIM powinny być zgodne z wcześniej ustalonymi zasadami opisanymi w BEP, przekazywanymi studentom wraz z materiałami wstępnymi. Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że dobrze przygotowane materiały wprowadzające do projektu umożliwiają płynne rozpoczęcie współpracy między studentami z różnych wydziałów.

Istotnym elementem mpiBIM są wykłady (pierwsze 4–6 tygodni semestru), podczas których koordynatorzy z poszczególnych wydziałów omawiają zasadnicze aspekty techniczny budynków będących tematami prac projektowych. Wykłady koncentrują się na kwestiach współpracy, koordynacji i współzależności funkcji, konstrukcji i systemów technicznych budynku. Ponadto ważnym elementem są warsztaty dotyczące narzędzi BIM, które umożliwiają i ułatwiają współpracę oraz koordynację w ramach BIM, takich jak BIMcollab, Solibri Office, Dalux czy inne. W przypadku dotychczasowych tematów prac projektowych w ramach mpiBIM (tab. 2) realizacja programu funkcjonalno-przestrzennego wymagała zastosowania zaawansowanych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych, w tym między innymi:

- konstrukcja budynku – duże rozpiętości dachów lub stropów, sal konferencyjnych, hal sportowych; budynki wysokie o zróżnicowanej funkcji; czasami konstrukcja budynku pełni

rolę architektoniczną, co wymaga szczegółowej koordynacji na linii architekt-konstruktor;

- system wentylacyjny – wentylacja mechaniczna wszystkich pomieszczeń; wentylacja obszarów podziemnych (garaże); wentylacja oddymiająca, zaawansowane technologie pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych (ogrzewanie i chłodzenie), określenie wielkości i lokalizacji szybów wentylacyjnych, central wentylacyjnych oraz systemów wymiany powietrza w pomieszczeniach, skoordynowanych z projektem architektonicznym budynku;
- instalacje wodno-kanalizacyjne – obsługa urządzeń sanitarnych w budynku, systemy przeciwpożarowe (tryskacze, hydranty), retencja wody deszczowej; wody szarej, inne.
- instalacje elektryczne – lokalna stacja transformatorowa, zaawansowane technologie energii odnawialnej zintegrowane z architekturą budynku. Oświetlenie ogólne, awaryjne i fasadowe – skoordynowane z projektem architektonicznym budynku. W związku z powyższym studenci WIL pracują nad projektem konstrukcyjnym stopniowo, jak krok po kroku zostają potwierdzone zasadnicze założenia interdyscyplinarne: rozmieszczenie funkcji pomieszczeń, zasadnicza konstrukcja nośna, lokalizacje i szacunkowe wartości maksymalnych obciążeń od urządzeń HVAC lub transformatorów. Dopiero wtedy, gdy zostały poczynione ww. założenia, studenci WIL mogą przystąpić do tworzenia modeli konstrukcji i modeli analitycznych dla całego obiektu lub samodzielnych części wydzielonych dylatacjami.

## 6. Zasady oceny prac projektowych

Ostateczna ocena i akceptacja projektów mpiBIM jest realizowana w dwóch krokach:

- publiczna końcowa prezentacja w 15. tygodniu, przez cały zespół międzywydziałowy
- prezentacje i/lub raporty branżowe przekazane koordynatorom odpowiednich wydziałów, w terminach uzgodnionych w ramach wydziałów

Zarówno prezentacja końcowa, jak i prezentacje/raporty dotyczące poszczególnych dyscyplin powinny być przygotowane w oparciu o modele BIM właściwe dla danej dyscypliny. Każda branża ma minimalny zakres prezentacji dla każdego etapu, określony przez koordynatorów dyscypliny, dostosowany do specyfiki projektu i zespołu, w którym pracują.

Studenci WIL na koniec przedmiotu mpiBIM przygotowują raport z realizacji projektu konstrukcyjnego, który zawiera między innymi:

- zwięzły opis projektu interdyscyplinarnego: funkcja, wymiary, liczba kondygnacji, warunki szczególne;
- krótki opis konstrukcji nośnej: przyjęte schematy konstrukcyjne, założone materiały nośne i wykończeniowe, elementy powtarzalne i unikalne;
- wyniki obliczeń z programu Robot/RFEM dotyczące:
  - weryfikacji głównych elementów konstrukcji nośnej (słupów, belek) dla elementów o największym obciążeniu w danej grupie (zdefiniowanej przez typ przekroju, wymiary, materiał,

klasę) – w tym sprawdzenie/weryfikacja wybranych elementów innymi metodami (ręcznie lub przy użyciu narzędzi innych niż programy Robot, RFEM);

- weryfikacji głównych elementów powierzchniowych (stropów, ścian) konstrukcji nośnej dla elementów najbardziej obciążonych w danej grupie (określonej przez grubość, materiał, klasę).

## 7. Podsumowanie doświadczenia studentów WIL – uczestników mpiBIM

Studenci WIL uczestniczący w przedmiocie mpiBIM doświadczają złożoności projektowania, które ma zazwyczaj charakter iteracyjny, od ogółu do szczegółu. Następujące działania mają kluczowe znaczenie dla skutecznego procesu projektowania:

- stopniowe udoskonalanie projektu, tak aby kolejne elementy mogły zostać zweryfikowane i zatwierdzone pod kątem nośności, np. strop typowej kondygnacji, belki na typowej kondygnacji, wybrane słupy i ściany, a następnie kolejne elementy głównej konstrukcji nośnej;
- zamrożenie projektu w taki sposób, aby kolejne zmiany miały charakter lokalny i nie zmieniały elementów, które zostały już zatwierdzone; a jeśli zmiana jest konieczna, jej wpływ jest ograniczony.

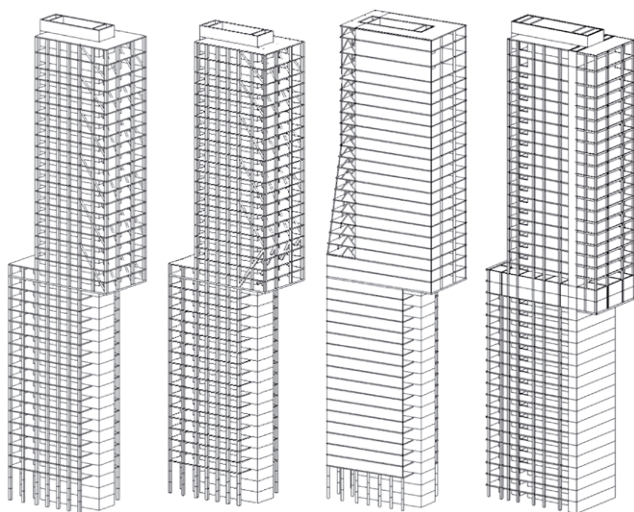
Studenci WIL przekonują się, jak trudny jest ten proces. Pomimo tego, że zmiany w innych branżach wprowadzane są prawie do samego końca prac projektowych, ostateczny projekt konstrukcyjny musi zostać potwierdzony obliczeniami. Niezależnie od stresu towarzyszącego ostatnim tygodniom prac projektowych, cały proces jest bardzo interesującym doświadczeniem. W odróżnieniu od innych przedmiotów studenci WIL w ramach mpiBIM muszą najpierw samodzielnie zdefiniować zasadniczy system nośny (a czasami kilka możliwych wariantów), a dopiero jeśli takie podejście okaże się czasochłonne i nieskuteczne, zgłaszają problem koordynatorowi. Jest to niezwykle ważny element pedagogiczny, ponieważ stymuluje samodzielną pracę, kreatywność oraz poczucie odpowiedzialności za projekt realizowany w ramach konkretnego zespołu projektowego. Ankiety przeprowadzone wśród studentów WIL po zakończeniu każdej edycji kursu mpiBIM pokazują, że po początkowym zamieszaniu (ponieważ zajęcia mpiBIM prowadzone są inaczej niż inne przedmioty) oceniają oni pozytywnie proces dochodzenia do projektu konstrukcyjnego poprzez testowanie i weryfikację kolejnych rozwiązań projektowych. Ponadto podczas dyskusji z przedstawicielami innych branż muszą nauczyć się praktycznej współpracy, w tym przekonania innych do proponowanych rozwiązań konstrukcyjnych, co jest niezwykle ważne, ponieważ dotyczy tzw. umiejętności miękkich, których trudno nauczyć się w ramach tradycyjnych zajęć. Takie podejście daje studentom poczucie własnej wartości i sprawia, że czują się odpowiedzialni za projekt.

W dotychczasowych edycjach projektu mpiBIM widoczny był bardzo wysoki poziom osobistego zaangażowania studentów w pracę zespołową. Z jednej strony studenci „czują”, że reprezentują swój macierzysty wydział w zespole i biorą odpowiedzialność

za swoje działania; z drugiej strony każdy z nich jest postrzegany w zespole jako „specjalista” w swojej dziedzinie. Nawet gdy pojawiają się luki w wiedzy branżowej studenci starają się szybko samodzielnie zgłębić dany temat, aby nie zagrozić realizacji całego projektu. Oczywiście, wraz z równoległą pracą w poszczególnych zespołach projektowych, studenci mają cotygodniowe konsultacje organizowane na macierzystych wydziałach, podczas których mogą dzielić się swoimi spostrzeżeniami, wątpliwościami lub konkretnymi problemami z koordynatorami. Ten aspekt konsultacji wydziałowych jest również niezwykle ważny. Koordynatorzy wydziałowi dbają o to, aby „ich” studenci osiągnęli dobre wyniki na końcu projektu.

Z rozmów ze studentami wynika, że końcowe prezentacje projektów są dla nich bardzo ważnym wydarzeniem. Na koniec każdej edycji mpiBIM zespoły prezentują projekt w formie plakatów lub prezentacji multimedialnej, wygłaszanej przez wszystkich członków zespołu. Towarzyszy temu trema, ponieważ często jest to ich pierwszy w życiu publiczny występ przed zgromadzoną w sali publicznością. Innym ważnym aspektem było to, że oprócz przedstawicieli uczelni i wydziału zaangażowanych w projekt, koordynatorzy przedmiotu zapraszają na te prezentacje również gości zewnętrznych: przedstawicieli firm współpracujących, redaktorów branżowych czasopism technicznych oraz przedstawicieli innych instytucji. Bardzo często takie uroczyste zakończenie przedmiotu mpiBIM było relacjonowane w prasie i mediach, co stanowiło dodatkową satysfakcję dla studentów uczestniczących w projekcie i służyło jako niezaprzeczalny atut do umieszczenia info o udziale w mpiBIM w CV. Wszystkie te elementy sprawiają, że mpiBIM wyróżnia się na tle innych kursów oferowanych w programach studiów [3].

Bardzo dobrym przykładem efektów dobrej współpracy interdyscyplinarnej i wzajemnego zrozumienia wymagań i oczekiwań poszczególnych dyscyplin jest projekt wieżowca przy ul. Grzybowskiej w Warszawie, przygotowany w trakcie edycji 8,



**Rys. 1.** Rozwój koncepcji wieżowca: od zbyt wiotkiego (lewa strona) do coraz bardziej sztywnego, a jednocześnie spełniającego oczekiwania architekta (prawa strona)

w roku akademickim 2024/2025. Studenci postanowili zmierzyć się z trudnym zadaniem: opracowanie projektu wyczerpującego wytyczne miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego, który m.in. zakłada możliwość nadwieszenia konstrukcji na długości ok. 10 m na wysokości ok. 80 m ponad powierzchnią terenu.

Rysunek 1 pokazuje etapy dochodzenia do konstrukcji, która spełnia oczekiwania architekta i jest akceptowalna przez konstruktora, czyli spełnia wymagania normowe w zakresie bezpieczeństwa i sztywności. Interdyscyplinarny Projekt Wieżowca przygotowany przez zespół w składzie: Łukasz Czerwiński (WIL), Paweł Skowron (WA), Paweł Nieściór (WIBHiIŚ), Oliwia Wichrowska (WIBHiIŚ), Piotr Wronko (WIBHiIŚ) zdobył drugą nagrodę w Konkursie dla Młodych Inżynierów 2024–2025 organizowanym przez redakcję czasopisma „Builder”.

## 8. Projekt Międzywydziałowego Centrum Badań Interdyscyplinarnych PW – Edycja 9

Przedmiotem zadania projektowego w roku akademickim 2025/2026 było wykonanie koncepcji urbanistyczno-architektonicznej i projektów branżowych dla Międzywydziałowego Centrum Badań Interdyscyplinarnych na terenie Kampusu BIS Politechniki Warszawskiej, zlokalizowanego pomiędzy ulicami: Nowowiejską, Polną, Braci Podolskich, Al. Armii Ludowej i Rektorską. Koordynatorzy mpiBIM 2025 postanowili, że zespół budynków Międzywydziałowego Centrum Badań Interdyscyplinarnych (MCBI) powinien spełniać poniższe założenia.

- Lokalizacja pomiędzy istniejącymi budynkami WEiTI i WIL oraz ul. Braci Podolskich i Rektorską.
- Uwzględnienie wymagań funkcjonalno-przestrzennych zgodnie ze szczegółowym programem i wymaganiami dla poszczególnych pomieszczeń.
- Podstawowe pomieszczenia lub zespoły pomieszczeń:
  - hol wejściowy wraz z kawiarnią,
  - przestrzeń wspólna – spotkania, praca zdalna, dostęp do wiedzy,
  - usługi gastronomiczne (kawiarnia + stołówka/bar),
  - sale wykładowe dla 60 osób: szt. 6,
  - sale wykładowe dla 100 osób: szt. 5,
  - sale wykładowe dla 150 osób (z możliwością połączenia w jedną): 3 (małe)/1 (duża),
  - sale wykładowe dla 300 osób: szt. 2,
  - laboratoria komputerowe (14 pomieszczeń dla 15 osób każde),
  - zaplecze dla osób pracujących w tych laboratoriach, jak i dla studentów tam przebywających czasowo, np. pokoje pracownicze, pokoje seminaryjne, pokoje BHP, pom. sanitarne,
  - serwerownie i zaplecze techniczne,
  - zaplecze magazynowe,
  - zlokalizowanie parkingów podziemnych zawierających maksymalną liczbę miejsc (3-4 kondygnacje podziemne). UWAGA: Kondygnacja podziemna -1 powinna umożliwiać wjazd ciężarówek, czyli wysokość i szerokość skrajni na poz. -1 oraz pochylni powinna być zgodna z właściwymi przepisami.
- Należy zapewnić towarowy transport pionowy do hal

laboratoriów. Wielkość wind należy dostosować do skali badanych elementów oraz wielkości maszyn.

- Należy przewidzieć konieczność zlokalizowania wybranych pomieszczeń z możliwością wyjścia na taras lub dach budynku oraz konieczność zapewnienia szczególnej nośności stropów, w celu realizacji badań na zewnątrz laboratoriów.

Laboratoria specjalistyczne, międzywydziałowe zdefiniowano w tabeli 4.

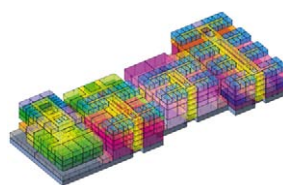
**Tabela 4.** Laboratoria specjalistyczne w budynku Międzywydziałowego Centrum Badań Interdyscyplinarnych

| Nr Lab | Nazwy laboratoriów i opis funkcjonalne   | Obciążenia użytkowe |
|--------|--|---------------------|
| 1      | Mocne i brudne: laboratorium do badania wytrzymałości małych próbek (węzłów) lub średniej wielkości elementów (np. belki, słupy, płyty o długości do 6 m); badania wytrzymałościowe materiałów, połączeń dla różnych geometrii i tworzyw; badania gruntu         | 5 – 7,5 kPa         |
| 2      | Ciche i sztywne: laboratorium akustyczne i izolowane od środowiska, tak że można badać właściwości akustyczne lub tłumiące drgania materiałów budowlanych  | 5 – 7,5 kPa         |
| 3      | Chemiczne: laboratorium badania własności materiałów budowlanych, ze stropami i ścianami odpornymi na chemikalia; z bardzo dobrą wentylacją  | 5 – 7,5 kPa         |
| 4      | Instalacji wszelakich: gdzie można badać układy instalacyjne jak i demonstrować ich działanie studentom  | 5 – 7,5 kPa         |
| 5      | Aerodynamiczne: tunel aerodynamiczne w celu realizacji badań naukowych i działań dydaktycznych różnych wydziałów, od architektury i urbanistyki, po obciążenie wiatrem nietypowych budowli jak i badania aerodynamiczne konstrukcji mostów i innych budowli inż. | 5 – 7,5 kPa         |
| 6      | Geodezyjno-metrologiczne: badanie systemów pomiarowych (GiP); geodezja satelitarna, kartografia mobilna; fotogrametria; projekto-modelowe w zakresie gospodarki przestrzennej  | 3 – 5 kPa           |
| 7      | Modelowania komputerowego oraz AR + VR – międzywydziałowe centrum koordynacji projektowej  | 3 – 5 kPa           |

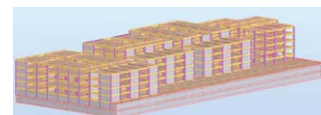
W szczegółowym programie funkcjonalno-przestrzennym podano liczbę użytkowników najważniejszych pomieszczeń, jak i wartości obciążeń użytkowych w pomieszczeniach laboratoriów i w magazynach im towarzyszących. Charakterystyczne wizualizacje 6 bardzo różnych projektów powstałych dla tych samych wymagań pokazano na rysunkach 2 i 3.

## 9. Opinie studentów z edycji 9 2025/2026

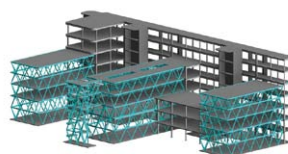
Opinie studentów o tym temacie prac projektowych oraz za-prezentowane prace projektowe dowodzą jak dobrze przedmiot mpiBIM odpowiada kryteriom realizacji działań dydaktycznych z pomocą metodyki „Project-Based Learning”. Zestawienie charakterystycznych opinii studentów uczestniczących w edycji 9 przedstawia tabela 3.



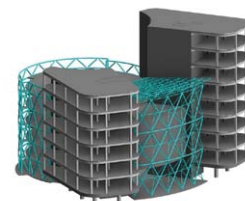
Zespół 1 – Model stref funkcjonalnych



Zespół 1 – Model MES w p. ROBOT



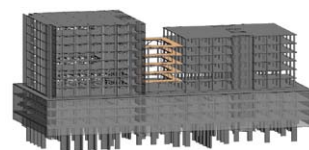
Zespół 2 – Model konstrukcji w p. Revit (część A)



Zespół 2 – Model konstrukcji w p. Revit (część B)



Zespół 3 – Projekt urbanistyczny

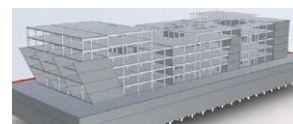


Zespół 3 – Model konstrukcji w p. Revit

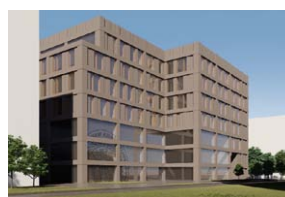
**Rys. 2.** Wizualizacja prac projektowych trzech zespołów 1, 2, 3 w edycji 9 mpiBIM



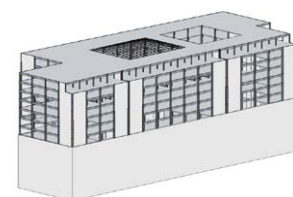
Zespół 4 – Wizualizacja projektu architekt



Zespół 4 – Model konstrukcji w p. Revit



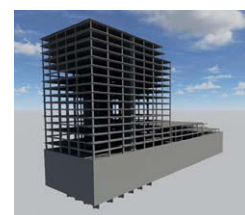
Zespół 5 – Wizualizacja projektu architekt



Zespół 5 – Model konstrukcji w p. Revit



Zespół 6 – Projekt architektoniczny – laboratoria wewnątrz wieżowca



Zespół 6 – Model konstrukcji w p. Revit

**Rys. 3.** Wizualizacja prac projektowych trzech zespołów 4, 5, 6 w edycji 9 mpiBIM

**Tabela 3** – Opinie studentów WIL o projekcie mpiBIM w edycji 9, 2025/2026

|   | Ocena stopienia złożoności zadania projektowego  | Ocena współpracy z WA i WIŚ  | Co poprawiliście lub nauczyliście się realizując ten projekt  | Generalna ocena projektu   |
|---|--|--|---|--|
| Zespół 1<br>studenci WIL:<br>Grigorii Chernyshov,<br>Eryk Podsiadło | Z naszej perspektywy temat był dość wymagający, w skali od 1 do 100 – oceniamy na 86/100.  | Niestety na początku bardzo długo czekaliśmy na wytyczne architektów (WA) odnośnie bryły, co stanowiło problem dla konstruktorów jak i instalatorów. Koledzy z WIŚ szybko i wyczerpująco odpowiadali na nasze pytania. | Planowania: czasami trzeba policzyć i zaproponować kilka rozwiązań<br>Negocjowania: zrozumienie argumentów drugiej strony i znalezienia kompromisu<br>Współpraca: z pomocą projektanta z firmy Peiko powstało nowe rozwiązanie konstrukcyjne. | Śmiało możemy dać ocenę celującą – jako projekt wszechstronnie rozwijający, a nie jedynie uczący używać kilku funkcji Revita, jak niektórzy myślą.                                     |
| Zespół 2<br>studenci WIL:<br>Jakub Biciutko<br>Piotr Porycki        | Poziom złożoności zadania oceniamy jako odpowiedni. Skala trudności wzrosła wraz z ambitną wizją architektoniczną, której sprostanie wymagało od nas dużego nakładu pracy. | Współpraca przebiegała w większości pomyślnie, ale momentami nawalała terminowość przekazywania plików – np. model architektoniczny z częścią podziemną otrzymaliśmy kilka dni przed prezentacją końcową.              | Realizacja projektu pozwoliła nam na przećwiczenie umiejętności pracy w zespole, naukę prezentacji przed publicznością oraz biegłość w obsłudze programów inżynierskich połączoną z rozwojem pomysłowości w kontekście wyzwań inżynierskich.  | Bezdiskusyjnie był to najciekawszy przedmiot na studiach, sprawdzający i utrwalający wiedzę nabytą na przestrzeni ostatnich lat.   |
| Zespół 3<br>studenci WIL:<br>Hubert Marczyk,<br>Jerzy Syfert        | Zadanie projektowe oceniamy jako trudny oraz wymagający temat; wymagało to od nas sporego zaangażowania na poziomie samego planowania oraz wykonywania modelu.             | Najintensywniej i jednocześnie najlepiej pracowało się nam z zespołem architektów. Obie strony były w stanie iść na kompromis w celu spełnienia oczekiwań drugiej branży.  | Nauczyliśmy się szybszego projektowania, z pomocą małych modeli. Poprawiliśmy umiejętności w zakresie organizacji swojego czasu i pracy na bieżąco, co przy tym poziomie złożoności projektu było niezbędne.                                  | Projekt jako całość był fantastycznym przeżyciem, wg nas najlepszy przedmiot jaki dotychczas mieliśmy na studiach.   |
| Zespół 4<br>student WIL:<br>Patrik Rakoczy                          | Stopień złożoności oceniam jako wysoki, ale idealnie dobrany – pozwalający na swobodę projektową i zróżnicowanie koncepcji pomiędzy zespołami.                             | Współpraca była pouczająca, ale nie brakowało wyzwań. Dzięki architektom budynek ma „duszę”. Architekci słuchali mnie jako konstruktora, nie negowali moich opinii. Ja starałem się realizować ich pomysły.            | Rozwinąłem znacznie moje umiejętności (p. Revit, RFEM, Grasshopper). Ten projekt realnie przygotowuje nas do pracy w zawodzie. Nauczyłem się jak słuchać, bronić swoich racji, dzielić się wiedzą.  | Jako całość projekt oceniam jako rewelacyjnie przygotowanie do pracy zawodowej, pokazuje nam realny proces projektowy, w którym konstruktor inżynier jest częścią wielkiego organizmu. |
| Zespół 5<br>student WIL:<br>Adrian Choptiany                        | Złożoność zadania była moim zdaniem bardzo wysoka. Jednak ostateczna postać projektu zależna była trochę od indywidualnej interpretacji i ambicji.                         | Dobrze mi się współpracowało z kolegami z innych wydziałów. Ale pierwszą ważną koncepcję architektoniczną, podstawę do obliczeń, dostałem w połowie grudnia.   | Nauczyłem się jak się tworzy projekt koncepcyjny od zera, o tym że podejmowane decyzje mają ogromne przełożenie na moją konstrukcję oraz na inne branże.  | Uważam, że mpiBIM to jedyna w swoim rodzaju okazja do rozwoju na naszych studiach.   |
| Zespół 6<br>student WIL:<br>Marcin Kurdeko                          | Zadanie było skomplikowane. Musiałem dużo czasu spędzić nad tym przedmiotem, jednak było to możliwe do wykonania.  | Bardzo fajnie się pracowało z moim zespołem. Zawsze otrzymywałem szybkie odpowiedzi i komentarze do bieżącego stanu projektu.  | Lepiej zrozumiałem proces projektowy, uświadomiłem sobie na czym polega współpraca architekta i inżyniera.  | Projekt jest bardzo fajną inicjatywą – poleciłbym każdemu, kto się nie boi wyzwania.   |

## 10. Podsumowanie

Dziewięć edycji przedmiotu mpiBIM udało się zrealizować w latach 2017–2025 dzięki pewnego rodzaju improwizacji i elastycznemu podejściu na poszczególnych wydziałach.

Elementy wspólne przedmiotu mpiBIM dla wszystkich wydziałów to:

- zespoły międzybranżowe tworzą studenci współpracujących wydziałów,
  - wspólne tematy prac projektowych,
  - terminy zajęć i podział czasu: 2/3 zajęcia międzywydziałowe, 1/3 zajęcia branżowe,
  - ten sam czas spotkań międzywydziałowych,
  - wspólne prezentacje prac projektowych przez całe zespoły.
- Wśród różnic międzywydziałowych można wymienić:
- szczegółowe cele specyficzne dla każdej z branż,
  - różne liczby punktów ECTS,
  - brak wspólnych zasad oceny prac projektowych,
  - brak wspólnych standardów oceny koordynacji lub współpracy międzywydziałowej.

Reasumując, przedmiot mpiBIM nie jest realizowany jako jeden przedmiot wspólny dla kilku wydziałów, ale jako konfederacja przedmiotów realizowanych w tych samych zespołach, w ramach pracy nad tymi samymi tematami. Być może jest to jedno ze źródeł sukcesu tego przedmiotu. Przedmiot mpiBIM nie wymaga szczegółowej formalnej koordynacji między wydziałami; wydziały rekrutują, uczą i oceniają swoich studentów zgodnie z odrębnymi standardami. Nie ma potrzeby koordynowania programów nauczania; wystarczy niewielka koordynacja

wyżej opisana. Podstawą pracy jest wiedza pozyskana przez studentów na wydziałach, w trakcie zajęć przed aktualną edycją mpiBIM oraz na zajęciach realizowanych równoległe do danej edycji mpiBIM. Studenci mają zróżnicowany poziom znajomości BIM i narzędzi; każdy pracuje nad projektem zgodnie ze swoją aktualną wiedzą i umiejętnościami.

W gronie nauczycieli-koordynatorów mpiBIM były dyskutowane dwa możliwe inne scenariusze rozwoju przedmiotu mpiBIM [4]:

- mpiBIM jako prawdziwy międzywydziałowy na poziomie uczelni, tzw. platoński „ideał”, którego realizacja wymaga wielu uzgodnień międzywydziałowych,
- przedmiot mpiBIM wdrożony przez „Centrum Interdyscyplinarnego Projektowania BIM”, które mogłoby integrować i rozwijać różnorodne działania w tym zakresie, a decyzja o jego powstaniu należy do władz Politechniki Warszawskiej.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Thomas J. W., A Review of the Research on Project-Based Learning, 1-45. San Rafael, CA: The Autodesk Foundation, 2000
- [2] Przybyłowicz P., Hyc D., Słyk J., Czmocho I., Bartkiewicz P., Daszczyński T., Kapler P., Rokicki Ł., Waszkiewicz M., Międzywydziałowy Projekt Interdyscyplinarny BIM na Politechnice Warszawskiej, Materiały Budowlane 4/2018
- [3] Czmocho I., Walendzik J., O korzyściach z wdrożenia MacroBIM+ w trakcie realizacji „międzywydziałowego projektu interdyscyplinarnego BIM”, jak i w codziennej praktyce, Builder Science 294, 1/2022, doi:10.5604/01.3001.0015.5936
- [4] Grochulski J., Hyc D., Przybyłowicz P., Czmocho I., Bartkiewicz P., Chudzik J., Daszczyński T., Waszkiewicz M., Raport projektu IBUD Przeprowadzenie zajęć z przedmiotu „międzywydziałowy projekt interdyscyplinarny BIM” o charakterze interdyscyplinarnym, wykorzystujących innowacyjne techniki kształcenia, ze szczególnym uwzględnieniem pracy grupowej i rozwiązywania problemów projektowych, Politechnika Warszawska, 2021–2022

# Projektowanie bez doświadczenia, nauka na błędach. Ćwiczenia laboratoryjne na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

Designing without experience, learning from mistakes. Laboratory exercises at the faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology

inż. Bartłomiej Piróg, inż. Julia Widurska, inż. Kinga Kapuścińska, Koło Naukowe Żelbetnik, dr inż. Maria Włodarczyk (ORCID: 0000-0002-9094-3410), prof. dr hab. inż. Robert Kowalski (ORCID: 0000-0002-0876-3489), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7431

**Streszczenie:** W artykule omówiono zmodyfikowany program merytoryczny ćwiczeń laboratoryjnych prowadzonych w ramach przedmiotu Konstrukcje betonowe na studiach pierwszego stopnia na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Zadaniem, jakie studenci mają do wykonania w ramach tych ćwiczeń, jest grupowe zaprojektowanie belki żelbetowej tak, aby przy narzuconych ograniczeniach przeniosła jak największe obciążenie. Studenci, będący po zaledwie jednym semestrze studiowania konstrukcji betonowych („świeże głowy”, bez doświadczenia) projektują belkę, samodzielnie ją wykonują, a następnie badają jej zachowanie pod obciążeniem aż do zniszczenia. Podczas wspólnych zajęć podsumowujących są dyskutowane: sposoby zniszczenia belek, błędy popełnione podczas ich projektowania lub to, co spowodowało, że pewne belki przeniosły obciążenie większe niż inne.  
**Słowa kluczowe:** laboratorium, belka żelbetowa, zbrojenie, ścinanie, nośność.

**Abstract:** The article presents the modified content of the laboratory exercises conducted as part of the course Concrete Structures in the first-cycle studies at the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology. The task that students have to perform in these exercises is to design a reinforced concrete beam in groups so that it can carry the greatest possible load within the imposed constraints. Students with just one semester of studying concrete structures („fresh minds”, with no experience) design a beam, build it themselves, and then study its behavior under load until failure. During the joint debriefing sessions, the following are discussed: ways in which beams were damaged, errors made during their design, or what caused some beams to carry a greater load than others.

**Keywords:** laboratory, reinforced concrete beam, reinforcement, shear, resistance.

## 1. Wprowadzenie

W roku akademickim 2021/22, na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (WIL PW), zmodyfikowano program merytoryczny ćwiczeń laboratoryjnych prowadzonych w ramach przedmiotu Konstrukcje betonowe na studiach I stopnia (inżynierskich).

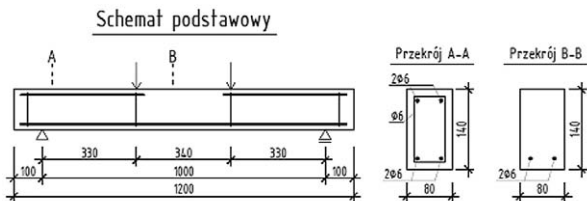
Zasadniczym zadaniem, jakie studenci mają do wykonania w ramach ćwiczeń, jest grupowe zaprojektowanie belki żelbetowej tak, aby przy narzuconych ograniczeniach przeniosła jak największe obciążenie. Studenci, będący po zaledwie jednym semestrze studiowania konstrukcji betonowych („świeże głowy”, bez doświadczenia) projektują belkę, samodzielnie ją wykonują, a następnie badają jej zachowanie pod obciążeniem aż do zniszczenia. Podczas wspólnych zajęć podsumowujących są dyskutowane: sposoby zniszczenia belek, błędy popełnione

podczas ich projektowania lub to, co spowodowało, że pewne belki przeniosły obciążenie większe niż inne. Grupy studentów, których belki przeniosły największe obciążenie są nagradzane. W artykule przedstawiono kluczowe założenia zmodyfikowanego programu ćwiczeń oraz najciekawsze belki z roku akademickiego 2022/23.

## 2. Program oraz najistotniejsze założenia i cele ćwiczeń

Jak już wskazano wyżej, kluczowym elementem omawianych ćwiczeń jest postawienie przed studentami, dopiero „wchodzącymi w świat” konstrukcji żelbetowych, zadania zaprojektowania jak najmocniejszej belki. Przyszli inżynierowie wykonują tę pracę grupowo, mając narzucone wstępne założenia. Są to: długość i wymiary przekroju belki, jej schemat statyczny,

klasa betonu i stali oraz podstawowe zbrojenie. Składa się ono z dwóch prętów umieszczonych dołem (rys. 1), czterech krótkich prętów górnych i czterech strzemion. Ma to na celu zapewnienie sztywności szkieletu zbrojenia. Ponadto każda grupa otrzymuje do dyspozycji 9 m pręta zbrojeniowego – do dowolnego wykorzystania, np. na pręty proste, strzemiona, pręty wyginane lub inne. Podczas projektowania kształtu i rozmieszczenia dodatkowego zbrojenia studenci mają pełną dowolność, tzn. nie wymaga się od nich, aby stosowali się do jakichkolwiek założeń normowych. Obowiązuje zasada „róbcie co chcecie”, aby belka była jak najmocniejsza.



Rys. 1. Schemat zbrojenia podstawowego belki

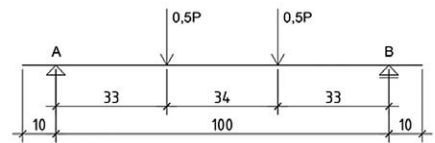
Po zaprojektowaniu belki studenci samodzielnie przygotowują jej zbrojenie oraz (czynnie lub biernie) biorą udział w jej betonowaniu. Następnie są prowadzone badania cech wytrzymałościowych stali i betonu i na podstawie uzyskanych wyników studenci prognozują obliczeniowo [1–5], pod działaniem jakiego obciążenia ich belka powinna ulec zniszczeniu. Obliczają też prognozowane ugięcia belki oraz szerokość rys (prostokątłych do osi belki) [2, 3, 6, 7], przy wybranych poziomach obciążenia. Powyższe parametry są określane w dwóch wariantach: na podstawie wartości średnich oraz na podstawie wartości normowych, tzn. z zapasami bezpieczeństwa. Porównanie uzyskanych wyników stanowi cenne doświadczenie, pozwalające studentom zmysławić sobie, jakie mogą być te zapasy. Ponadto studenci są zobowiązani do wskazania wszelkich odstępstw od wymagań normowych, jakie poczynili podczas projektowania „swoich” belek. Kolejny etap ćwiczeń to badanie belki. Wstępnie jest ona dziesięciokrotnie obciążana i odciążana do poziomu odpowiadającego obciążeniu eksploatacyjnemu (tzn. ok. 50–70% prognozowanej siły niszczącej), a następnie obciążana aż do zniszczenia. Przy wybranych poziomach obciążenia są wykonywane pomiary ugięcia oraz rozstawu i szerokości rys. Najistotniejsze jest jednak zarejestrowanie (szkice, fotografie) sposobu, w jaki belka uległa zniszczeniu. W sprawozdaniu z badań studenci porównują wyniki obliczeń (nośności belki, ugięć oraz rozstawów i szerokości rys) z wynikami pomiarów. Najistotniejsze jest jednak odniesienie się do sposobu zniszczenia belki, a w szczególności skomentowanie, co spowodowało zniszczenie, tzn. czy było to np. zginanie, ścinanie, brak zakotwienia prętów (lub inne) oraz jakie popełniono błędy i co można było poprawić.

Na zakończenie ćwiczeń, podczas wykładu, poszczególne grupy prezentują swoje dokonania, po czym odbywa się dyskusja (wspólnie z prowadzącymi ćwiczenia), mająca na celu naukę na popełnionych błędach. Wprowadzone zajęcia są bardzo dobrze odbierane przez studentów.

### 3. Opis badań doświadczalnych

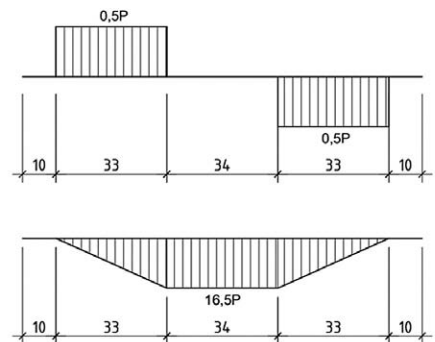
Podstawowym celem badań doświadczalnych zginanych belek żelbetonowych zaprojektowanych i wykonanych przez studentów w ramach prac laboratoryjnych było określenie ich nośności i wskazanie, przy jakim sposobie zbrojenia została ona osiągnięta. Badania doświadczalne obejmowały belki żelbetonowe różniące się między sobą sposobem wykonania zbrojenia. Do badań przyjęto schemat statyczny belki jednoprzęsłowej swobodnie podpartej o rozpiętości pomiędzy podporami 1000 mm, obciążonej dwiema siłami skupionymi usytuowanymi w 1/3 rozpiętości (rys. 2).

Obciążenie realizowane było w sposób statyczny z kilkukrotnymi odciążeniami odzwierciedlając tym samym obciążenie eksploatacyjne.



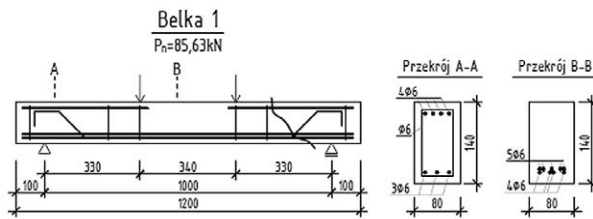
Rys. 2.

Schemat statyczny belki wraz z wykresem sił tnących i momentów



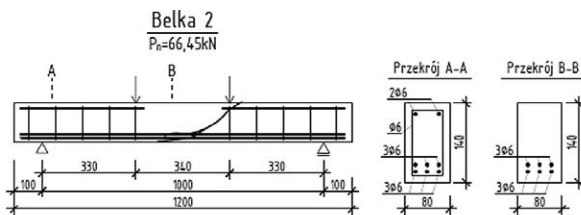
#### 3.1. Opis elementów badawczych

Badania doświadczalne obejmowały belki żelbetonowe o wymiarach 80x140x1200 mm wykonane z betonu tej samej klasy – C30/37, o takiej samej ilości użytego zbrojenia, łącznie na pręty zbrojenia podłużnego i strzemiona, o średnicy 6 mm i  $f_{yk} = 500$  MPa. Wszystkie belki miały podstawowe zbrojenie (rys. 1). Różnica pomiędzy belkami wynikała ze sposobu wykorzystania przyznanej puli zbrojenia na pręty podłużne lub strzemiona w zależności od wybranego projektu belki tak, aby przy zadanym schemacie statycznym uzyskać jak największą nośność. Oprócz narzuconego zbrojenia podłużnego studenci mogli w pełni swobodnie kształtować zbrojenie, ponieważ w ramach ćwiczeń laboratoryjnych dopuszczono odstępstwa od obowiązujących norm projektowych. W projektowanych elementach pominięto także aspekty związane z trwałością elementu żelbetonowego oraz spełnieniem wymagań pożarowych. Niżej omówiono sposób zbrojenia czterech wybranych belek. Dla belki 1 (rys. 3) oprócz podstawowego podłużnego na całej długości belki w strefie rozciąganej zastosowano dodatkowe 2 pręty  $\varnothing 6$ , oraz dwa pręty w obszarze czystego zginania. Jako zbrojenie na ścinanie zastosowano 2 pręty odgięte pod kątem 60° oraz dwa strzemiona umieszczone w odległości 110 mm od siły.



Rys. 3. Schemat zbrojenia belki 1 i miejsce zniszczenia

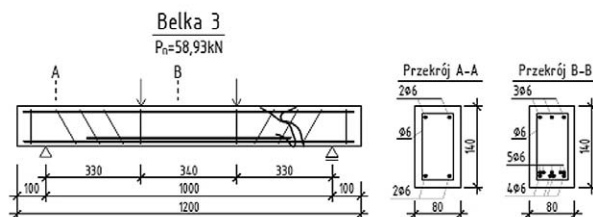
Zbrojenie belki 2 wykonano z prętów prostych oraz strzemion pionowych (rys. 4). Jako zbrojenie dolne, na całej długości belki, zastosowano 6 prętów  $\varnothing 6$  ułożonych w dwóch rzędach. Natomiast zbrojenie górne stanowiły cztery pręty proste znajdujące się w obszarze od podpory do punktu przyłożenia siły. Służyły one jako pręty montażowe do podtrzymania strzemion. Oprócz czterech obowiązkowych strzemion zastosowano 6 strzemion pionowych rozmieszczonych w stałych odległościach 95 mm na odcinku występowania sił poprzecznych (rys. 4).



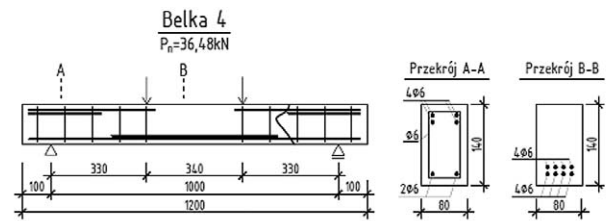
Rys. 4. Schemat zbrojenia belki 2 i miejsce zniszczenia

W belce 3 oprócz zbrojenia podstawowego zostało zaprojektowane i wykonane zbrojenie podłużne składające się z prętów prostych o zróżnicowanej długości (rozmieszczonych symetrycznie) oraz jednego pręta odgiętego pod kątem  $60^\circ$  umieszczonego w osi symetrii przekroju (rys. 5). Zbrojenie górne to pręty proste łączone na zakład w miejscu przyłożenia siły skupionej. W belce zastosowano 6 strzemion pochyłych do osi belki pod kątem  $60^\circ$ .

W belce zbrojenie wykonano z prętów prostych oraz strzemion pionowych (rys. 6). Zbrojenie dolne zostało rozmieszczone w dwóch rzędach po cztery pręty w każdym. Na całej długości belki w narożach umieszczono pręty długości 1150 mm. Natomiast w obszarze czystego zginania (rys. 2) umieszczono dodatkowo pręty krótsze o długości 550 i 600 mm. W strefie ściskanej zbrojenie podłużne zastosowano na odcinku ścinania. Strzemiona pionowe rozmieszczono w stałej odległości 95 mm. W strefach przypodporowych zastosowano 2 rzędy zbrojenia górnego.



Rys. 5. Schemat zbrojenia belki 3 i miejsce zniszczenia



Rys. 6. Schemat zbrojenia belki 4 i miejsce zniszczenia

## 4. Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

### 4.1. Badania materiałowe

Badania wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzono na kostkach sześciennych o wymiarach  $150 \times 150 \times 150$  mm. Badanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej Controls Automax zgodnie zaleceniami normy PN-EN 12390-3 [8]. Średnie wartości wytrzymałości dla poszczególnych zarobków zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wytrzymałość betonu na ściskanie

|                     | Belka 1 | Belka 2 | Belka 3 | Belka 4 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|
| $f_{cm,cube}$ [MPa] | 46,10   | 52,13   | 46,33   | 52,13   |

Badanie granicy plastyczności stali wykonano według PN-EN ISO 6892-1 [9]. Średnia granica plastyczności wynosi  $f_{yk} = 589$  MPa, a moduł sprężystości  $E_s = 207$  GPa.

### 4.2. Nośność belek żelbetowych

W związku z tym, że głównym celem było zaprojektowanie belki zginanej o jak największej nośności w artykule skupiono się na jej analizie. Pierwszym krokiem było oszacowanie teoretycznej siły niszczącej  $P_n$ , przyjmując średnie wielkości wytrzymałości betonu na ściskanie i granicy plastyczności wyznaczone w badaniach materiałowych. Uzyskane siły teoretyczne i rzeczywiste siły niszczące  $P_n$  zarejestrowane podczas badań doświadczalnych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Siły niszczące teoretyczne ( $P_t$ ) i rzeczywiste ( $P_n$ )

| Nr belki | $P_t$ | $P_n$ | $P_n/P_t$ | $P_{t,min}/P_{t,max}$ |
|----------|-------|-------|-----------|-----------------------|
|          | [kN]  | [kN]  | [%]       | [%]                   |
| Belka 1  | 85,63 | 77,62 | 110       | 100                   |
| Belka 2  | 66,45 | 60,67 | 111       | 78                    |
| Belka 3  | 58,93 | 76,67 | 77        | 69                    |
| Belka 4  | 36,48 | 76,56 | 48        | 43                    |

Porównując wyniki zestawione w tabeli 2, zaobserwowano, że największą siłą przeniosła belka 1 i wynosiła ona 110% oszacowanej wielkości teoretycznej, natomiast najmniejszą siłą zarejestrowano dla belki 4, co dało 43% siły oszacowanej.

### 4.3. Analiza sposobu zniszczenia i błędów projektowych

#### Belka 1

Zniszczenie belki 1 nastąpiło przy obciążeniu  $P_n = 85,63$  kN, co stanowi wartość wyższą od przewidywanej obliczeniowo ( $P_t = 77,62$  kN). Obraz zniszczenia belki pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Obraz zniszczenia belki 1

Analiza mechanizmu zniszczenia wskazuje, że wyczerpanie nośności miało miejsce bezpośrednio pod punktem przyłożenia siły skupionej (rys. 3 i 7). Do uszkodzenia doszło w strefie między strzemieniem a prętem odgiętym. Zniszczenie nastąpiło prawdopodobnie z powodu braku zbrojenia na ścinanie, które zgodnie z wymaganiami normy [2] powinno przejść 50% siły poprzecznej. W celu zwiększenia nośności na ścinanie i uniknięcia zniszczenia ze względu na ścinanie [10] należałoby zwiększyć stopień zbrojenia na ścinanie w strefie przypodporowej poprzez zagęszczenie rozstawu strzemion.

W projekcie tej belki zastosowano następujące odstępstwa od wymagań normowych. Dotyczyły one przekroczenia maksymalnego rozstawu strzemion w strefie ścinania oraz zastosowanie mniejszej wartości otuliny niż jest wymagana. Zastosowana otulina miała grubość 10 mm, podczas gdy „normowa” wartość wynosi 20 mm. Z uwagi na ograniczoną dostępność stali zbrojeniowej, zdecydowano się na ograniczenie długości zakotwienia prętów. W elemencie zastosowano łącznie sześć strzemion, z czego cztery (zbrojenie podstawowe, rys. 1) wynikały wyłącznie z wymogów konstrukcyjnych. Ze względu na ich lokalizację, bezpośrednio pod siłami skupionymi oraz w strefach przypodporowych, nie biorą one udziału w przenoszeniu sił ścinających, pełniąc jedynie funkcję montażową. Efektywne zbrojenie na ścinanie stanowią w tym przypadku tylko dwa strzemiona oraz dwa pręty odgięte.

#### Belka 2

Belka 2 uległa zniszczeniu przy sile  $P_n = 66,45$  kN. Wyczerpanie nośności nastąpiło w przekroju w okolicy miejsca przyłożenia siły skupionej (rys. 4 i 8). Było to zniszczenie „między zginaniem a ścinaniem” [10]. Po powstaniu rysy ukośnej przekrój uległ zniszczeniu ze względu na ścinanie.

Aby poprawić parametry wytrzymałościowe belki, korzystne mogłoby okazać się skrócenie prętów umieszczonych w drugim rzędzie i wykorzystanie zaoszczędzonego w ten sposób zbrojenia do zwiększenia liczby strzemion.



Rys. 8. Obraz zniszczenia belki 2

Odstępstwa, jakich dopuszczono się przy projektowaniu omawianej belki, to niezachowanie normowej grubości otuliny oraz odległości pomiędzy prętami zbrojenia podłużnego mniejszych niż wymagane [2]. Normowa wartość otuliny w przypadku takiego elementu wynosi 20 mm oraz minimalny rozstaw podłużny strzemion 20 mm.

#### Belka 3

Belka 3 uległa zniszczeniu przy sile  $P_n = 58,93$  kN. Zniszczenie elementu nastąpiło przez powstanie rysy ukośnej w strefie przypodporowej, co stanowi charakterystyczny sposób zniszczenia w wyniku ścinania (rys. 5 i 9). Zaobserwowano także odspojenie się betonu na grubości otuliny.

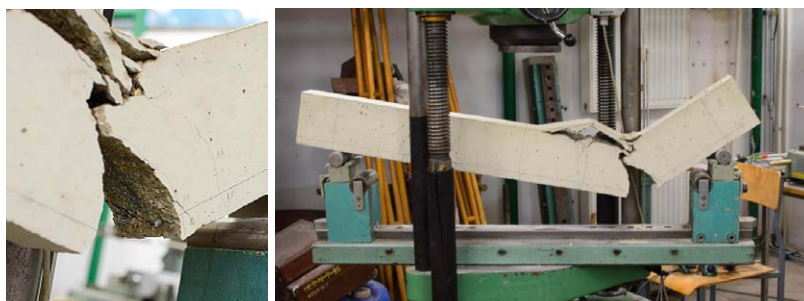
W projekcie elementu dopuszczono się odstępstw od wymagań normowych dotyczących takich aspektów jak długość zakotwienia. W zaprojektowanym elemencie wystąpił całkowity brak zakotwienia pręta odgiętego, który miał przejść część siły poprzecznej. Jednak w związku z brakiem prawidłowego zakotwienia pręta efekt ten był bliski zera i podczas próby obciążenia pręt został wyrwany z betonu. Kolejnym odstępstwem był kąt nachylenia zbrojenia ukośnego przyjęty  $60^\circ$  [2] i w związku z tym zbyt duże rozstawy tego zbrojenia.

W celu zwiększenia nośności zginanej belki żelbetowej konieczne byłoby wprowadzenie zmian w projekcie jej zbrojenia. Kluczową modyfikacją powinno być zapewnienie pełnej długości zakotwienia prętów odgiętych, co umożliwiłoby im efektywne przenoszenie sił ścinających. Brak długości zakotwienia wynikał z ograniczonej dostępności prętów zbrojeniowych. Materiał ten można było pozyskać ze zbędnego zbrojenia w postaci prętów znajdujących się w strefach przypodporowych przy górnej krawędzi belki. Ponadto należałoby wprowadzić zmianę geometrii zbrojenia poprzecznego. Zastosowany kąt nachylenia



Rys. 9. Obraz zniszczenia belki 3

strzemion i prętów odgiętych wynoszący  $60^\circ$  jest nieoptymalny. Zmiana tego kąta na  $45^\circ$  pozwoliłaby uzyskać większą nośność elementu, którego zniszczenie wynikało z wyczerpania nośności na ścinanie. Odspojenie fragmentu betonu wynikające ze złej współpracy między stalą a betonem wynikało najprawdopodobniej ze źle dobranej grubości otuliny i braku strzemion pionowych oraz braku zakotwienia zbrojenia w miejscu przyłożenia obciążenia (rys. 5).



Rys. 10. Obraz zniszczenia belki 4

#### Belka 4

Rzeczywista wartość obciążenia niszczącego wyniosła  $P_n = 36,48$  kN, co stanowi najniższy wynik spośród wszystkich rozpatrywanych belek. Zniszczenie elementu nastąpiło w strefie przypodporowej, pomiędzy końcami prętów zbrojeniowych górnych i dolnych (rys. 6 i 10) ze względu na ścinanie. Pręty podłużne zbrojenia dolnego w okolicy przyłożenia siły uległy zerwaniu. Zaobserwowano także odspojenie otuliny betonowej wzdłuż górnej krawędzi elementu.

Analiza schematu statycznego oraz wykresu momentów zginających i sił poprzecznych (rys. 2, 6 i 10) wskazuje na błędne rozmieszczenie zbrojenia. W rozpatrywanym schemacie statycznym na całej rozpiętości belki rozciąganiu podlegają włókna dolne. Tymczasem w omawianej belce zastosowano zbrojenie typowe dla schematu z obustronnym utwierdzeniem (zbrojenie górne przy podporach, rys. 6), co w tym przypadku było bezzasadne. Nadmiarowe zbrojenie strefy górnej nie przyczyniło się do zwiększenia nośności belki, podczas gdy dolna strefa rozciągana pozostała niedostatecznie dozbrojona. Przeniesienie prętów z góry na dół znacząco poprawiłoby nośność elementu. Ostatecznie, jak przedstawiono na rysunku 10, belka uległa zniszczeniu w przekroju, w którym strefa rozciągana była zbrojona jedynie dwoma prętami  $\varnothing 6$  i w konsekwencji doszło do ich zerwania.

Odstępstwem od wymagań normowych w projektowanym elemencie jest niedostosowanie się do minimalnej odległości między prętami podłużnymi. W projekcie w przypadku niektórych prętów odległość ta wynosiła jedynie 10 mm, a według wymagań normowych powinna wynosić minimum 20 mm. Zastosowano rozstaw strzemion większy niż normowy [2] wynoszący 84 mm oraz grubość otuliny wynoszącą jedynie 10 mm podczas gdy norma przewiduje 20 mm.

## 5. Podsumowanie

Analiza przeprowadzonych badań pozwoliła na zidentyfikowanie powtarzających się błędów, które miały bezpośredni wpływ na obniżenie nośności badanych belek zginanych. Do jednych z częściej pojawiających się problemów należało nieprawidłowe zakotwienie prętów. Długość zakotwienia często była niewystarczająca lub w skrajnych przypadkach pomijano ją całkowicie. Prowadziło to do powstawania rys ukośnych, a w konsekwencji do przedwczesnego zniszczenia elementu,

objawiającego się wykruszeniem, pękaniem i odspojeniem betonu. Kolejną zaobserwowaną nieprawidłowością była zbyt mała grubość otuliny, skutkująca odspajaniem się betonu. W rezultacie obniżeniu uległa nośność belki zarówno na zginanie, jak i ścinanie, co sprzyjało powstawaniu nadmiernych deformacji i uszkodzeń.

W bekach 1 i 3 zastosowano pręty odgięte pod kątem  $60^\circ$  oraz podobne strzemiona. Przyjęcie innego kąta nachylenia zbrojenia (np.  $45^\circ$  [2]) pozwoliłoby na bardziej racjonalne „pokrycie zbrojeniem” strefy ścinania.

Z dydaktycznego punktu widzenia na podkreślenie zasługuje, że studenci:

- mają obowiązek, ale i możliwość pracy grupowej,
- samodzielnie przygotowują zaprojektowane przez siebie zbrojenie belki oraz biorą udział w jej betonowaniu,
- porównują wartości kluczowych parametrów opisujących zachowanie się elementu pod obciążeniem, określone jako „rzeczywiste” (na poziomie wartości średnich) z określonymi z normowymi zapasami bezpieczeństwa, a następnie porównują wyniki obliczeń z wynikami badań (pomiarów),
- analizują sposób, w jaki zaprojektowana przez nich belka została zniszczona i co najistotniejsze
- sami uczą się na własnych błędach.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Starosolski W., Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych, Tom 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013
- [2] PN-EN 1992-1-1:2008: Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [3] EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, 2004
- [4] International Federation for Structural Concrete (fib), fib Model Code for Concrete Structures 2020, Lausanne, 2023
- [5] Szylak K., Wpływ normowych modeli materiałowych betonu i stali zbrojeniowej oraz metod analizy na nośność i niezawodność zginanych belek żelbetowych, Inżynieria i Budownictwo 4/2025, str. 409–414
- [6] Słowik M., Wpływ osłabienia betonu rozciąganego na rozwój zarysowania i niszczenia belek betonowych i żelbetowych, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, tom LXVIII, 1/2019
- [7] Noakowski P., Rysy w żelbecie jako język konstrukcji – różne formy zarysowania i ich interpretacje, Inżynieria i Budownictwo 9–10/2022, str. 444–451
- [8] PN-EN 12390-3:2019-7: Badanie betonu – Część 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [9] PN-EN ISO 6892-1:2010: Metale. Próba rozciągania. Część 1. Metoda badania w temperaturze pokojowej
- [10] Dąbrowski M., Stachurski A., Zieliński J. L., Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych. Tom 1, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2006

# Ogólnopolski sukces konkursu „Dźwigar w Dechę 2026” organizowanego przez Wydział Inżynierii Lądowej oraz Koło Naukowe Konstrukcji Metalowych

Wiktorija Matyga (ORCID: 0009-0008-3902-6087), Zofia Tylman (ORCID: 0009-0000-5790-6004), Paweł Galemba (ORCID: 0009-0008-5536-6663), mgr inż. Dominik Pacholec (ORCID: 0009-0003-5909-6158), dr inż. Maciej Cwyl (ORCID: 0000-0002-2894-7840), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

17 kwietnia 2026 roku na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej odbyła się druga edycja ogólnopolskiego konkursu pod nazwą „Dźwigar w Dechę 2026”. Wydarzenie, zorganizowane przez Wydział Inżynierii Lądowej oraz Koło Naukowe Konstrukcji Metalowych, przyciągnęło rekordową liczbę uczestników z wiodących ośrodków akademickich w Polsce, stając się jednym z najważniejszych tego typu ogólnopolskich wydarzeń w bieżącym roku akademickim.



**Rys. 1.** Koło Naukowe Konstrukcji Metalowych – organizatorzy konkursu

## 2. Cele i wyzwania konkursowe

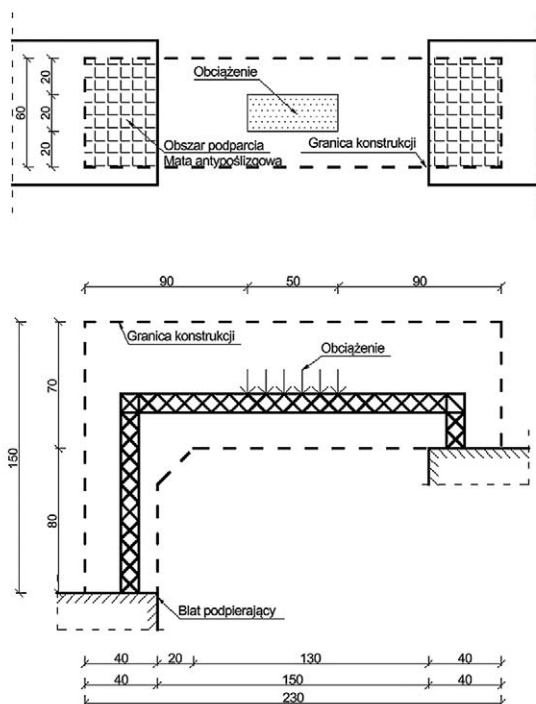
Głównym założeniem konkursu jest praktyczna weryfikacja kompetencji inżynierskich studentów w zakresie projektowania oraz wykonawstwa lekkich konstrukcji prętowych. Zadanie polegało na opracowaniu projektu i budowie przestrzennego dźwigara z kształtowników z drewna iglastego o masie nieprzekraczającej 1 kg. Rywalizacja odbywała się

w kilku kluczowych kategoriach. Pierwszą z nich było maksymalne obciążenie, gdzie liczyła się jak największa wytrzymałość konstrukcji. Drugą kategorią była estetyka, która obejmowała nie tylko precyzję ukształtowania poszczególnych węzłów, ale także dbałość o geometrię wszystkich składowych ustroju, powtarzalność elementów oraz staranność wykończenia powierzchni materiału. Kolejną kategorią była przewidywana nośność, która wymagała od uczestników precyzyjnego oszacowania parametrów wytrzymałościowych własnego projektu, co jest kluczowym elementem profesjonalnej praktyki inżynierskiej.

Proces projektowy determinowany był przez szereg restrykcyjnych wymagań materiałowych i geometrycznych. Do wzniesienia konstrukcji dopuszczono wyłącznie profile drewniane o wymiarach poprzecznych nieprzekraczających 10x10mm. Wprowadzony zakaz chemicznej obróbki i uszlachetniania drewna obliłował uczestników do oparcia obliczeń na nominalnych parametrach czystego materiału iglastego. Węzły konstrukcyjne, stanowiące newralgiczne punkty każdego dźwigara, mogły być wzmacniane drobnymi elementami drewnianymi, takimi jak kołki czy kliny, przy jednoczesnym braku limitów co do liczby łączonych profili czy gabarytów samego węzła.

Równie istotne były zdefiniowane warunki brzegowe dotyczące geometrii całego ustroju. Konstrukcje musiały charakteryzować się rozpiętością w przedziale od 1,5 do 2,3 m, przy czym dolna granica definiowała jednocześnie dystans w świetle między blatami wsporczymi o różnicy wysokości 80 cm. Maksymalna wysokość dźwigara została ograniczona do 1,5 m względem niższej podpory, co przy uwzględnieniu wymiarów strefy podparcia 40x60 cm wymuszało staranną analizę stateczności globalnej.

Obciążenie przykładano na obszarze o wymiarach 20x50 cm za pomocą stalowych płaskowników dokładanych przez samych uczestników, co nadawało procesowi charakter dynamiczny i niepowtarzalnej próby badawczej.



Rys. 2. Regulaminowy schemat konkursowej konstrukcji

### 3. Ponaduczelniana integracja środowiska inżynierskiego

Skala tegorocznej edycji potwierdziła rosnący prestiż wydarzenia na mapie akademickiej Polski. Do rywalizacji przystąpiło aż 37 drużyn, reprezentujących zróżnicowane środowiska naukowe m.in.: Politechniki Warszawskiej, Koszalińskiej, Wrocławskiej, Poznańskiej, Białostockiej, Gdańskiej, Lubelskiej, Częstochowskiej oraz Bydgoskiej, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Wojskowej Akademii Technicznej, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego oraz Akademii Sztuk Pięknych.

Wspólnie ze studentami swoje projekty reprezentowali uczniowie szkół średnich, którzy poziomem swoich prac dorównywali starszym kolegom.

### 4. Mechanizmy zniszczenia konstrukcji

Najczęściej obserwowanym słabym punktem konstrukcji były węzły, których jakość wykonania nie pozwalała na pełne wykorzystanie nośności zastosowanych prętów. W wielu przypadkach zniszczenie inicjowało się w miejscach połączeń, gdzie dochodziło do rozklejenia elementów. Skutkowało to przerwaniem ciągłości przekazywania sił w układzie, a w konsekwencji prowadziło do utraty nośności całej konstrukcji.

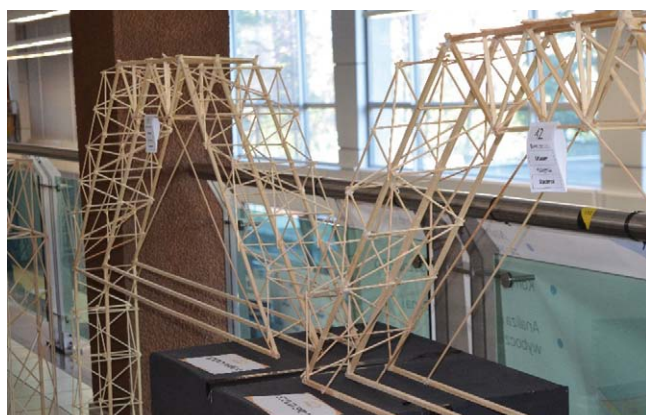
Istotną przyczyną awarii były również zjawiska związane z utratą stateczności. W wielu modelach pojedyncze układy płaskie były stosunkowo poprawnie usztywnione i stężone w swojej płaszczyźnie. Znacznie słabiej rozwiązane było wzajemne powiązanie równoległych układów płaskich oraz

zapewnienie bocznego podparcia prętów ściskanych. Niedostateczne stężenie z płaszczyzny prowadziło do zwiększenia efektywnych długości wybożeniowych elementów ściskanych w kierunku bocznym. W rezultacie obserwowano boczne przemieszczenia tych prętów, którym często towarzyszyło skręcenie całego dźwigara. Zachowanie to miało charakter zbliżony do zwirzenia. Potwierdzeniem dominującej roli zjawisk statecznościowych był fakt, że zniszczenie bardzo rzadko wynikało z wyczerpania nośności przekrojowej prętów, takiego jak zerwanie lub zmiażdżenie materiału w przekroju elementu.



Rys. 3. Widoczne ugięcie konstrukcji bezpośrednio przed wyczerpaniem nośności i utratą stateczności

Analiza wyników pozwoliła na sformułowanie istotnych wniosków dotyczących optymalizacji schematów statycznych. Zaobserwowano, iż konstrukcje, które uzyskały najwyższą nośność, zostały wyposażone w umiejętnie usytuowane (w strefie rozciąganej dźwigara) ściągi, co znacząco wpłynęło na poprawę ich parametrów wytrzymałościowych. Rozwiązanie to stanowi bezpośrednie potwierdzenie teorii mechaniki budowli w praktyce inżynierskiej. Zastosowanie ściągów pozwoliło na przejście sił rozpory i redukcję składowych poziomych reakcji podporowych, co z kolei ograniczyło momenty zginające w pasie górnym i ustabilizowało geometrię całego ustroju pod obciążeniem skupionym.

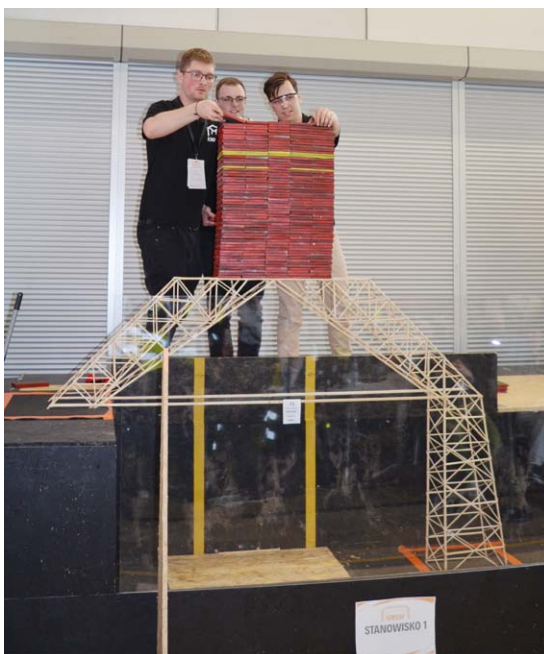


Rys. 4. Modele dźwigarów wykorzystujące ściągi do przejścia składowych poziomych reakcji podporowych

Przeprowadzone obserwacje wskazują, że kluczowe znaczenie dla nośności tego typu konstrukcji ma nie tylko jakość wykonania, lecz także prawidłowe zaprojektowanie układu stężeń. Samo stosowanie prętów o masywnych przekrojach nie zawsze jest rozwiązaniem efektywnym ani uzasadnionym, ponieważ może prowadzić do znacznego zwiększenia masy konstrukcji przy niewielkim wzroście jej rzeczywistej nośności.

## 5. Synergia nauki i biznesu: pasja inżynierska w praktyce

Realizacja przedsięwzięcia o tak szerokim zasięgu była możliwa dzięki zaangażowaniu partnerów instytucjonalnych i biznesowych. Patronaty ministra edukacji narodowej, marszałka województwa mazowieckiego, prezydenta m.st. Warszawy, PZITB oraz rektora Politechniki Warszawskiej podkreślają rangę wydarzenia i znaczenie inicjatyw studenckich w kształceniu przyszłych kadr budowlanych. Współpraca z branżą nadała konkursowi profesjonalny charakter – 19 firm budowlanych zapewniło wsparcie organizacyjne oraz atrakcyjne nagrody, motywując uczestników do rywalizacji. Wsparcia wydarzeniu udzieliły firmy: Athenasoft, Atlas Ward, Dekpol, Leroy Merlin, Hantverkarpoolen, Buro Happold, PKBI, DECCO, Budimex, Mazowiecka Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa, Dłubał, CFE, KMTCE, NDI, Peri, Vinci Construction, Skanska, CAS, STRABAG. Wydarzenie stało się platformą wymiany doświadczeń między nauką a rynkiem pracy, umożliwiając studentom prezentację umiejętności i nawiązywanie relacji zawodowych. Dla przedsiębiorców była to okazja do obserwacji przyszłych inżynierów w praktyce – od planowania konstrukcji po reakcję na stres i optymalizację rozwiązań. Takie połączenie środowiska akademickiego z biznesem sprzyja powstawaniu wartościowych kontaktów zawodowych. Ogromne podziękowania należą się Gospodarzom wydarzenia, tj. władzom Wydziału Inżynierii Lądowej, szczególnie dziekanowi prof. dr hab. inż. Andrzejowi Garbaczowi i prodziekan dr inż. Wioletcie Jackiewicz-Rek, bez pomocy których nie byłoby możliwości realizacji konkursu o tak dużym, ogólnopolskim zasięgu. Przygotowania tego rodzaju wydarzenia trwały ponad 8 miesięcy i w jego realizację było



**Rys. 5.** Zwycięski dźwigar zespołu reprezentującego Koło Naukowe Konstrukcji Metalowych poddawany próbie obciążeniowej

zaangażowanych ponad 30 studentów z Koła Naukowego Konstrukcji Metalowych, Wydziału Inżynierii Lądowej PW, którzy z ogromnym zaangażowaniem przygotowali, poprowadzili i zorganizowali całe przedsięwzięcie.

## 6. Podsumowanie

Tegoroczny poziom zawodów był niezwykle wysoki, co potwierdziły uzyskane rezultaty. Studenci z Koła Naukowego Konstrukcji Metalowych Politechniki Warszawskiej zdominowali kategorię maksymalnego obciążenia i estetyki, w której zwyciężył zespół „CRAZY FROGS” w składzie: Hubert Budziak, Paweł Galemba oraz Mateusz Konopka, osiągając rekordowy wynik 581,4 kg. Na podium w kategorii maksymalnego obciążenia stanęły także zespoły z Politechniki Poznańskiej oraz Wrocławskiej. W rywalizacji uczniów

szkół średnich pierwsze miejsce zajął zespół z Zespołu Szkół Budowlanych i Ogólnokształcących w Biłgoraju reprezentowany przez Szymona i Karola Górę. Kolejne miejsca zajęły zespoły z Zespołu Szkół Zawodowych nr 1 w Skierniewicach oraz Technikum Budownictwa i Architektury nr 1 w Warszawie. W kategorii „Przewidywana Nośność” oraz „Decha w RFEM-ie” zwyciężył zespół z Politechniki Wrocławskiej.



**Rys. 6.** Zwycięzcy kategorii maksymalne obciążenie oraz estetyka – zespół „CRAZY FROGS”: Hubert Budziak, Mateusz Konopka i Paweł Galemba

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Łubiński M., Żółtowski W., Konstrukcje metalowe część II, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2008
- [2] Łubiński M., Żółtowski W., Konstrukcje metalowe część I, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2007
- [3] Cwyl M., Wierzbicki S. J., Brodacki H., Krzyżanowska K., Machoń M., Typowe błędy realizacyjne w prętowych konstrukcjach hal stalowych, Builder 9/2023, doi: 10.5604/01.3001.0053.8468

# Koło Naukowe Mostowców Politechniki Warszawskiej – wspólne sukcesy na polu mostowo-tunelowym

dr inż. Wojciech Karwowski (ORCID: 0000-0002-8488-3407), Szymon Napiórkowski, Paweł Pachla – studenci, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

W tym roku Wydział Inżynierii Lądowej obchodzi wraz z Politechniką Warszawską swoje 200-lecie. Wydział to pracownicy oraz studenci. To z jednej strony – ze strony kadry – badania naukowe oraz dzielenie się wiedzą oraz z drugiej strony – studenckiej – chłonięcie przekazywanej wiedzy i aktywności studenckiej. Te ostatnie mają różny charakter i często są to pierwsze proste badania naukowe lub działania doskonalące, wykorzystujące zdobytą wiedzę i ostatecznie do badań prowadzące. Studentów zainteresowanych takim kierunkiem działań skupiają studenckie koła naukowe. Jednym z nich jest Koło Naukowe Mostowców (KNM), założone w latach siedemdziesiątych, działające następnie z różną aktywnością, zależną od liczebności, specjalności i uwarunkowań organizacyjnych uczelni. W nowych warunkach istnienie koła zostało sformalizowane 5 stycznia 2004 roku. Koło skupia przede wszystkim studentów specjalności Mosty i Budowle Podziemne, ale również sympatyków z wcześniejszych lat studiów, kiedy jeszcze nie ma specjalności, a także sympatyków z innych specjalności zainteresowanych zagadnieniami mostowo-tunelowymi, taki bowiem jest profil działalności koła. Współpraca osób o różnych zainteresowaniach z kierunków Budownictwo i Civil Engineering skutkuje wieloma sukcesami i aktywnościami: wygrane konkursy, wyjazdy na konferencje naukowe jako słuchacze i prezentujący, szkolenia (jako szkoleni i szkolący). Każda pozawydziałowa inicjatywa koła to również okazja do promocji Wydziału Inżynierii Lądowej i Politechniki Warszawskiej w Polsce i na arenie międzynarodowej.

## 2. Opiekunowie i członkowie

KNM nie funkcjonowałoby tak dobrze bez wsparcia ze strony kadry. Pierwszym opiekunem KNM po formalnej reaktywacji w 2004 roku był prof. dr hab. inż. Henryk Zobel. Obecnie w tej roli świetnie się odnajdują jego dwoje opiekunów. Opiekunem formalnym KNM jest dr inż. Wojciech Karwowski, który należy do branży mostowej i ma nieograniczoną pulę pomysłów na nowe inicjatywy. Opiekunem pomocniczym KNM jest prof. uczelni dr hab. inż. Monika

### Rys. 1.

Zwiedzanie stacji Metro Politechnika, 2023 r.

(źródło: KNM)



### Rys. 2. Wigilia KNM, 2025 r.

(źródło: KNM)



Mitew-Czajewska, która należy do branży tunelowej i jej kontakty, w tym międzynarodowe, bardzo pomagają w poszerzaniu wiedzy poprzez uczestnictwo w licznych konferencjach. Oboje są zawsze chętni pomóc w rozwiązaniu problemów i umożliwieniu realizacji przedsięwzięć.

Koło Naukowe Mostowców to jednak przede wszystkim studenci wraz ze swoimi pomysłami i pracą na rzecz koła. Na dzień pisania tego artykułu liczba członków koła wynosi 34, co pozwala podejmować wiele inicjatyw naraz, w tym i większe inicjatywy, jaką jest np. zbliżająca się konferencja studencka MiTy – Mosty i Tunele.

## 3. Papier materiałem konstrukcyjnym – sukcesy w gdańskim konkursie „wyKOMBinuj mOst”

Studenci Wydziału Inżynierii Lądowej uczą się na co dzień o materiałach konstrukcyjnych, takich jak stal, żelbet, drewno. Nie ma przedmiotu związanego z właściwościami wytrzymałościowymi oraz kształtowaniem konstrukcji z papieru, a mógłby, patrząc na osiągnięte nośności modeli KNM w konkursach „wyKOMBinuj mOst”.

Ogólnopolski konkurs „wyKOMBinuj mOst” jest organizowany corocznie od 2008 roku przez Koło Naukowe Mechaniki Konstrukcji KOMBO na Politechnice Gdańskiej. Zadaniem

**Tabela 1.** Sukcesy Koła Naukowego Mostowców w konkursie „wyKOMBinuj mOst” w latach 2011–2025

| Rok         | 2011   | 2012   | 2013   | 2014   | 2015   | 2016   |
|-------------|--|--|--|--|--|--|
| I miejsce   | <b>„Moment Krętu”</b><br>Gosia Belka,<br>Karol Drabik,<br>Marcin Walenda<br>2640 N, 1056 g         | -  | <b>„Double X”</b><br>Michał Swoboda,<br>Natalia Vrublewska,<br>Maria Komarivska<br>2970 N, 457 g   | <b>„Tensengrity”</b><br>Zofia Waliszewska,<br>Mateusz Puławski,<br>Jakub Mielczarek<br>2600 N, 784 g           | <b>„Most Wanted”</b><br>Karol Siwicki,<br>Piotr Wieczorek,<br>Szymon Milczarek<br>3090 N, 737 g      | <b>„Magnaci Kleju”</b><br>Krzysztof Nowak,<br>Wioleta Krześlak,<br>Bartosz Olkowski<br>3150 N, 1184 g      |
| II miejsce  | -  | <b>„Moment Krętu”</b><br>Małgorzata Belka,<br>Karol Drabik,<br>Marcin Walenda<br>3250 N, 876 g | -  | <b>„Samograj”</b><br>Agnieszka Bejer,<br>Natalia Komorowska,<br>Marcin Ratajczyk<br>1870 N, 803 g              | -  | -  |
| III miejsce | -  | -  | <b>„Martwy Ciąg”</b><br>Marcin Rykaczewski,<br>Paweł Wojtaszek,<br>Tomasz Rybicki<br>2500 N, 764 g | <b>„Triple X”</b><br>Michał Swoboda,<br>Igor Jędrzejewski,<br>Jakub Szulak<br>1780 N, 782 g                    | -  | -  |
| Rok         | 2017   | 2018 – 2021  | 2022   | 2023   | 2024   | 2025   |
| I miejsce   | <b>„Kilerów Trzech”</b><br>Krzysztof Kaczor,<br>Piotr Rozwałka,<br>Michał Swoboda<br>1310 N, 444 g | -  | <b>„PWniaczki”</b><br>Jakub Końka,<br>Karol Urbańczyk,<br>Krzysztof Buchała<br>4408 N, 1234 g      | <b>„PWniaczki”</b><br>Jakub Końka,<br>Łukasz Kruk,<br>Daniel Stefanowicz<br>3037 N, 1309 g                     | <b>„PWniaczki”</b><br>Daniel Stefanowicz,<br>Karol Fijałkowski,<br>Łukasz Kruk<br>3440 N, 1266 g     | <b>„Rurki z klejem”</b><br>Aleksandra Trościańczyk,<br>Julia Król,<br>Piotr Karaszkiwicz<br>3669 N, 1069 g |
| II miejsce  | -  | -  | <b>„Orzeł 1”</b><br>Michał Pawłowski,<br>Julia Czaplicka,<br>Sviatoslav Miniailo<br>3861 N, 1084 g | <b>„Żbiki z Politechniki”</b><br>Kamila Dziubak,<br>Łukasz Porzyc,<br>Przemysław Kruczkowski<br>2255 N, 1129 g | <b>„THE MOSTowcy”</b><br>Julia Król,<br>Ola Trościańczyk,<br>Piotr Karaszkiwicz<br>2514 N, 1058 g    | -  |
| III miejsce | -  | -  | -  | -  | <b>„Mości Kapibary”</b><br>Szymon Napiórkowski,<br>Piotr Sala,<br>Michał Pastuszak<br>2526 N, 1076 g | <b>„Mostozauy”</b><br>Marta Warońska,<br>Jakub Papaj,<br>Hubert Budziak<br>2439 N, 1133 g                  |

konkursowym, realizowanym przez trzyosobowe zespoły w czasie ok 7–8 godzin (zależnie od edycji), jest sklejenie mostu z papieru o rozpiętości 100 cm. Zwycięstwo zapewnia najkorzystniejszy stosunek wytrzymałości na zginanie pod zdefiniowanym obciążeniem do masy modelu.

Studenci Koła Naukowego Mostowców rozpoczęli swoją przygodę w tej rywalizacji w 2011 roku, wygrywając 4. Edycję konkursu. Cztery drużyny, które pojechały z WIL-u do Gdańska zajęły kolejno 1, 4, 5 i 6 miejsca. Ich wygrana rozpoczęła trwającą do dzisiaj passę sukcesów członków Koła Naukowego Mostowców (tab. 1).

Zanim członkowie KNM pojadą do Gdańska, przygotowują się solidnie do konkursu, poznając charakter pracy i ćwicząc budowę modeli. Zdobyta wiedza projektowa i doświadczenie są przekazywane z pokolenia na pokolenie nowym studentom podczas realizacji próbnych konstrukcji, nad czym od ponad dziesięciu lat czuwa Michał

Swoboda – zwycięzca edycji konkursu z 2013 roku, rok roznie towarzyszący młodszym koleżankom i kolegom w fazie przygotowań. Pierwsze konkursowe kroki studenci stawiali kiedyś pod okiem Prof. Wojciecha Gilewskiego, który zaszczepił im naukowe podejście do zagadnienia i czuwał nad wewnętrznymi eliminacjami. Teraz studenci spotykają się we własnym gronie (nie licząc technicznego wsparcia Michała), analizując teoretycznie swoje pomysły, a następnie przechodząc od teorii do praktyki podczas przygotowywania drewnianych stelaży („rusztowań”), wycinania elementów, składania i klejenia konstrukcji. Szczególną uwagę zwracają na trenowanie precyzji wykonania, aby uniknąć wszelkich imperfekcji obniżających nośność. Gotowe modele są obciążane w maszynie wytrzymałościowej. Jest to okazja do odkrycia ewentualnych błędów, które przed konkursem muszą być wyeliminowane. Jest to świetna nauka poprzez zabawę.

**Rys. 3.**

Przygotowania do konkursu „wyKOMBinuj mOst”, 2016 r. (źródło: KNM)



**Rys. 4.** Drużyny KNM w konkursie „wyKOMBinuj mOst”, 2025 r. (źródło: KNM)



W 2026 roku Koło Naukowe Mostowców wystawiło cztery zespoły w tym konkursie: „vaMOST”, „PWPW”, „Odklejeni” i „PWniaczki”. Ostatecznie w tegorocznej edycji 1. miejsce zajęła drużyna „vaMOST” w składzie: Wiktoria Baranowska, Justyna Wieteska, Anthony Majdi Farid Aburumman z modelem ważącym 1148 g, który przeniósł 3012 N. Na 3. miejscu podium znalazł się zespół „Odklejeni” w składzie: Jakub Papaj, Piotr Sala i Jan Mikulski, którego most o masie 1264 g przeniósł 2392 N. Kolejny sukces, jaki zapewnili swoją pracą, jest powodem do dumy i radości dla wszystkich członków KNM. Ale koło nie spoczywa na laurach – przed kołem wciąż czeka wyzwanie pobicia rekordu konkursu, który został ustanowiony w 2022 roku przez zespół „PWniaczki” i wynosi prawie 4500 N przeniesionego obciążenia przy masie konstrukcji 1234 g. Za rok podczas jubileuszowej dwudziestej edycji „wyKOMBinuj mOst” będzie kolejna okazja. Już teraz mocno trzymamy kciuki, aby rok 2027 przyniósł nowy historyczny sukces. Przyszli zwycięzcy krążą już być może po korytarzach naszego wydziału...

#### 4. Nie taki ciężki kawałek metalu – BRICO oraz DE&CO

Tradycję budowania większych konkursowych konstrukcji – tym razem ze stali – zapoczątkował w 2016 r. zespół Dimensionless, startując w pierwszej edycji estońskiego konkursu The Nordic Steel Bridge Competition w skrócie BRICO. Już za pierwszym podejściem pobili konkurencję, zdobywając pierwszą nagrodę. Swój sukces próbowali powtórzyć rok później, jednak z powodu błędów wykonawczych – to też jest nauka – nie udało się. Konstrukcja była następnie szczegółowo analizowana po konkursie w zrealizowanej pracy dyplomowej.

Na kolejną próbę zbudowania mostu ze stali należało poczekać do 2023 roku. Była to pierwsza popandemiczna edycja konkursu DE&CO (Design & Construct International

Steel Bridge Competition), na której KNM wystawiło dwa zespoły. Udział w konkursie był jednym z tych doświadczeń, które w naturalny sposób łączą akademickie projektowanie z realiami budowy. Liczyła się nie tylko nośność. O wyniku decydował przede wszystkim dobry projekt – dający pewność, że wszystkie elementy są możliwe do łatwego złożenia – logistyka montażu, czas montażu oraz jego precyzja.

Konkurs organizowany przez Uniwersytet Bosforski w Turcji postawił przed zespołami zadanie zaprojektowania i wykonania modelu mostu stalowego, który spełnia rygorystyczne wymagania regulaminowe. Konstrukcja o długości 6 m musiała zostać zaprojektowana, wykonana, a następnie przewieziona w częściach do Stambułu. Na miejscu most był składany pod baczynym okiem oceniających ten proces sędziów, a następnie obciążany płytami stalowymi o łącznym ciężarze 1250 kg, których lokalizacja na konstrukcji była wskazywana już na miejscu, wcześniej projektanci znali tylko możliwe punkty przyłożenia siły testowej. O wyniku decydowała suma wielu składowych m.in. masa konstrukcji, czas montażu, poprawność procesu montażu (symulacja budowy z jej ograniczeniami), przemieszczenie pod obciążeniem, ale też i estetyka. Naruszenie warunków regulaminowych powodowało naliczenie kar.

**Rys. 5.** Zespół Dimensionless na BRICO 2016 r. (źródło: Facebook/ Dimensionless)



**Rys. 6.** Zespół Dimensionless na BRICO 2017 r. (źródło: Facebook/ Dimensionless)



Na chwilę obecną koło ma na swoim koncie dwukrotny start w konkursie, podczas których zaprezentowało łącznie trzy modele mostów. Pierwsza z opisywanych konstrukcji – Most Beautiful – była belkową konstrukcją kratownicową stworzoną z myślą o niskiej masie oraz sprawnym montażu. Ciekawym aspektem kształtowania układu skratowania było zastosowanie optymalizacji topologicznej. Elementy pomostu zostały wycięte przy pomocy lasera z płaskiego arkusza blachy, a następnie wygięte. Wbrew oczekiwaniom projektantów i wykonawców, konstrukcja nie wygrała konkursu. Realizacja projektu Most Beautiful

**Rys. 7.** Most Beautiful  
DE&CO 2023 r.  
(źródło: KNM)



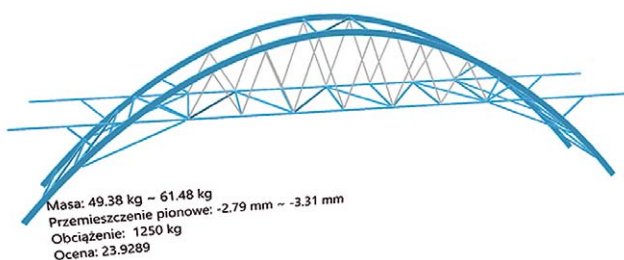
**Rys. 8.** Kartal 7  
DE&CO 2023 r.  
(źródło: KNM)



dostarczyła za to cennej lekcji, że każdy koncept może zostać pogrzebany przez dokładności wykonawcze. Drugim modelem był most Kartal 7 („kartal” w języku tureckim oznacza orła), most łukowy z podwieszonym pomostem. Wyróżniającym się elementem tej konstrukcji był podwójny łuk z profili zamkniętych połączonych skratowaniem typu N. Most charakteryzował się znakomitą odpowiedzią na obciążenie, ale niestety jednocześnie stosunkowo dużą masą w porównaniu z konkurentami. Został jednak doceniony za swoje walory estetyczne wygrywając w kategorii „najładniejszy most”.

Drugim podejściem był most Kartal 1 – ulepszona wersja swojego poprzednika. Nowy model został znacznie odchudzony, zredukowano masę do 63 kg względem Kartala 7 ważącego 122 kg, wciąż przy przemieszczeniach spełniających warunki konkursowe. W ramach prac projektowych wykorzystano narzędzia modelowania parametrycznego dzięki

**Rys. 9.** Kartal 1  
DE&CO 2024  
(źródło: KNM)



**Rys. 10.** Model mostu Kartal 1 w programie Rhino (źródło: KNM)

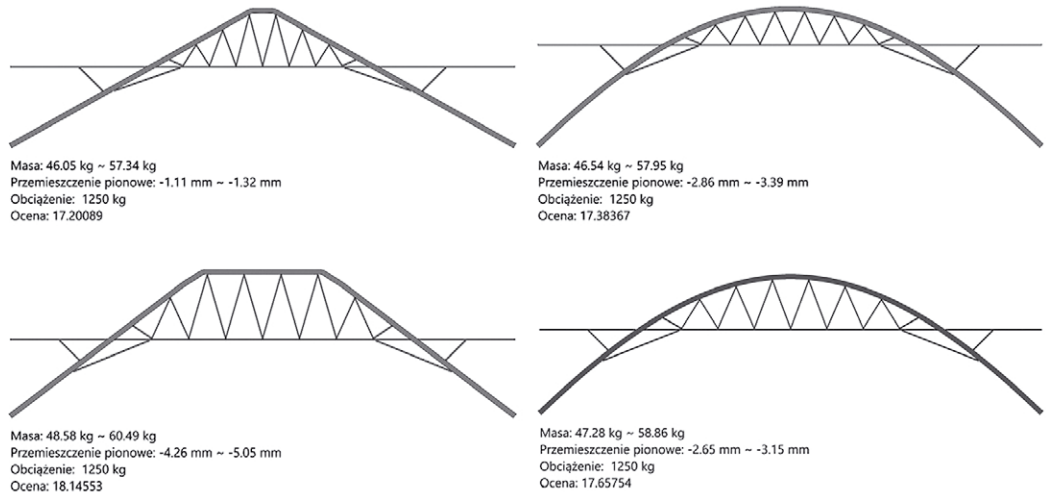
czemu możliwe było szybkie porównywanie wielu konfiguracji geometrii. Wysiłek opłacił się, tym razem Koło Naukowe Mostowców zajęło drugie miejsce w konkursie Design & Construct International Steel Bridge Competition 2024. Owocem startu w konkursie była praca magisterska (po poprzednim konkursie powstała praca inżynierska), w której w uporządkowany sposób opisany został cały proces projektowy mostu Kartal 1, a także przeanalizowane rzeczywiste zachowanie mostu pod obciążeniem konkursowym. Ostatecznie zaprojektowano jeszcze bardziej zoptymalizowaną nową konstrukcję – być może pod którąś z kolejnych edycji konkursu. W pracy dyplomowej skupiono się jednak przede wszystkim na wyjaśnieniu procesu modelowania parametrycznego, wyboru zmiennych do parametryzacji powiązanych ze sposobem oceniania koncepcji. Praca była projektem opartym na podobnych algorytmach, jakie mogą występować przy projekcie rzeczywistej konstrukcji pełnoskalowej.

Przedstawiono w niej konstrukcje Most Beautiful i Kartal 7, a następnie szczegółowo odtworzono proces projektowy oraz wykonawczy konstrukcji Kartal 1. Ostatecznie w oparciu o wnioski z praktyki konkursowej (błędy wykonawcze, rzeczywiste zachowanie się konstrukcji pod obciążeniem) zaprojektowano ulepszoną wersję konstrukcji Kartal 1. Uporządkowano i uzupełniono proces optymalizacji konstrukcji w zautomatyzowanym środowisku projektowym, z wykorzystaniem dwóch zaawansowanych narzędzi – oprogramowania do modelowania parametrycznego Rhino Grasshopper oraz powiązanego programu obliczeniowego MES Oasys GSA.

Przy użyciu Rhino Grasshopper stworzono parametryczny model mostu, który w różnych wersjach po zadaniu obciążenia oraz warunków brzegowych był poddawany analizie MES w Oasys GSA. Zadana geometria konstrukcji oraz wyniki obliczeń statycznych stanowiły składowe funkcji oceniającej (ang. fitness function), opartej na parametrach konstrukcyjnych podlegających ocenie w konkursie wraz z nadanymi im wagami. Zmiennymi zadawanymi były między innymi wysokość łuku, geometria krzywej tworzącej łuk, rozstawy elementów, geometria podwieszenia, wymiary przekrojów itd. Łącznie zdefiniowano jedenaście parametrów, które opisywały ostateczną wersję modelu. Wynikiem końcowym operacji analizy była wartość liczbowa (ocena), dzięki której możliwe było obiektywne porównywanie różnych konfiguracji parametrów w modelu.

Cały proces wyboru optymalnej geometrii został w znaczącym stopniu zautomatyzowany. Polegał on na iteracyjnym wprowadzaniu zmian w modelu, a następnie stosowaniu algorytmu optymalizacji który pomagał odnaleźć minimum funkcji oceniającej. Podejście to okazało się bardzo skuteczne na etapie koncepcji. Pozwoliło testować i porównywać różne rozwiązania konstrukcyjne, a jednocześnie model był łatwy w edycji więc możliwe było szybkie wprowadzanie zmian. Jak się okazało stanowiło to kluczowy

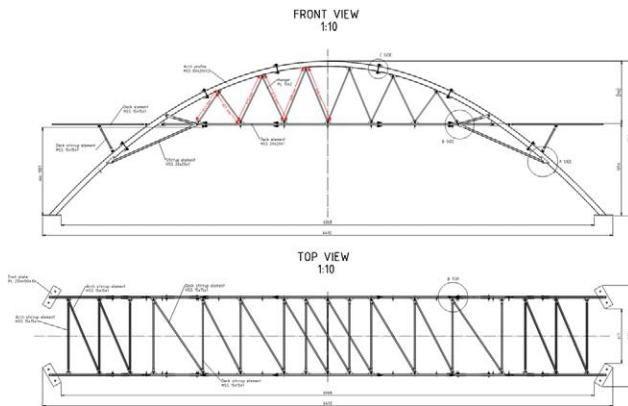
**Rys. 11.** Wybrane rozważane koncepcje geometrii mostu Kartal 1 (źródło: KNM)



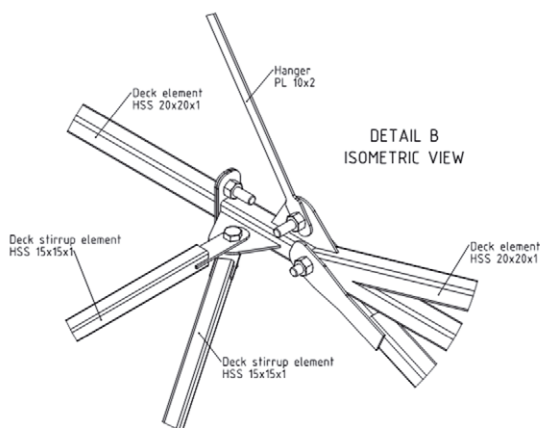
**Rys. 12.** Skrypt Grasshopper tworzący model Kartal 1 (źródło: KNM)



**Rys. 13.** Widoki stanowiące fragment dokumentacji mostu Kartal 1 (źródło: KNM)



**Rys. 14.** Widok na jeden z detali połączeń (źródło: KNM)



aspekt, ponieważ regularnie pojawiały się nowe pomysły, które wymagały sprawdzenia co oznaczało modyfikację modelu obliczeniowego.

W wyniku przeprowadzonych działań otrzymano równie wytrzymałą, ale lżejszą konstrukcję, która – w przypadku jej realizacji i zgłoszenia do konkursu – miałyby realne szanse na zwycięstwo. Zmodyfikowana konstrukcja Kartal 1 ma masę 54 kg, co stanowi znaczną poprawę w stosunku do pierwotnej konstrukcji Kartal 1, która miała masę 62 kg przy tych samych wymaganiach użyteczności (ugięcia). W przypadku przygotowań do konkursu i pierwotnej konstrukcji Kartal została przygotowana dokumentacja rysunkowa detali połączeń oraz podziału na elementy transportowe. Skupiono się na rozwiązaniu detali połączeń w taki sposób, żeby umożliwić szybkie składanie konstrukcji. Ważne było, żeby do każdej śruby możliwy był łatwy dostęp ręcznymi kluczami. Przygotowano również szczegółowe rysunki wykonawcze na podstawie których zamówione zostały elementy stalowe. Efektem kilkumiesięcznych prac był Kartal 1 konstrukcja, która na tle konkurencji charakteryzowała się najlepszym stosunkiem masy do przemieszczenia (waga 63,03 kg, przemieszczenia pod obciążeniem 1,25t równe 4,5 mm). Cały proces był sprawdzaniem praktycznych umiejętności. Zawodnicy musieli wykazać się zmysłem inżynierskim projektując konstrukcję, zarządzać budżetem projektu, zgłębić tajniki wykonawstwa, a następnie przetransportować konstrukcję do Turcji.

Obecna konstrukcja – algorytm jej projektowania – gotowa jest do przejścia przez nowy zespół, zapewne uaktualnienia

do obowiązujących warunków konkursu, wykonania warsztatowej dokumentacji rysunkowej i zaprezentowania w konkursie. Kwestią czasu pozostaje, kiedy znajdą się nowi śmiałkowie, chcący podjąć się tego zadania ponownie. A poprzedni uczestnicy – przygotowują już prawdziwe konstrukcje w pracy zawodowej. Choć podobnie, jak w przypadku mostów papierowych, gotowi są przekazać wiedzę, przeszkolić następców.

## 5. Warto słuchać i rozmawiać – konferencje

Same zajęcia w ramach programu studiów to za mało, w kontekście wciąż zmieniającego się rynku budowlanego, aby poznać najnowsze rozwiązania w budownictwie. Każda branża to mnóstwo firm i rozwiązań, o czym najlepiej przekonała się ostatnio 7-osobowa delegacja członków KNM podczas World Tunnel Congress 2025 w Sztokholmie. Udział w tej dużej międzynarodowej konferencji pokazał studentom bogactwo i różnorodność firm branży tunelowej. Nabyta na sesjach konferencyjnych wiedza i możliwość



**Rys. 15.** Uczestnicy ITA-CET Training Courses w ramach WTC 2025 w Sztokholmie, 2025 r. (źródło: KNM)

**Rys. 16.** Uczestnicy Underground Construction Prague 2023 (źródło: KNM)



**Rys. 17.** Uczestnicy III (33) Poznańskiego Seminarium Mostowego, 2025 r. (źródło: KNM)



**Rys. 18.** Organizatorzy I Studenckich MiTów, 2017 r. (źródło: <https://www.facebook.com/studenckie.mity>)

bezpośredniego porozmawiania z autorami prezentowanych rozwiązań to zdecydowanie szersze doświadczenie niż nawet najlepszy wykład na sali wykładowej.

Kolejną okazją do poszerzenia wiedzy będzie udział w międzynarodowej konferencji Underground Construction Prague 2026. Już w maju bieżącego roku grupa ponad 30 członków KNM wyruszy do Pragi, którzy uczestniczyć będą w sesjach wykładowych, wycieczkach technicznych itd.

Studenci nie zapominają, że nazwa ich koła odnosi się do branży mostowej. Równie chętnie uczestniczą w konferencjach o tej tematyce. Wrocławskie Dni Mostowe oraz seminaria organizowane przez Związek Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej są okazją do wysłuchania polskich prelegentów i poznania krajowych doświadczeń branży przekraczającej przeszkodę górą.

Wydarzenia na poziomie międzyuczelnianym są również okazją do wymiany doświadczeń i zbudowania nowych znajomości. W 2017 roku członkowie Koła Naukowego Mostowców Politechniki Warszawskiej zaproponowali i zorganizowali na WIL PW I Studencką Konferencję „Mosty i Tunele”. Głównym elementem tego wydarzenia jest konkurs referatów, opartych głównie na pracach inżynierskich i magisterskich prelegentów. Kolejne edycje odbyły się w Gliwicach, Gdańsku, Krakowie i Zielonej Górze. Obecny skład KNM podjął się ponownie organizacji konferencji na Politechnice Warszawskiej – 200-lecie uczelni jest tu świetną motywacją. Konferencja odbędzie się w październiku bieżącego roku. W mediach społecznościowych wkrótce pojawi się więcej informacji o VI edycji.

## 6. Podsumowanie

Wiele inicjatyw nie zmieściło się na łamach tego artykułu, ale to nic straconego. Przestrzeń do ich prezentacji są media społecznościowe koła, do odwiedzenia których zapraszamy: [www.facebook.com/mostowcy/](http://www.facebook.com/mostowcy/).

Niewielki wycinek opisany wyżej z działalności Koła Naukowego Mostowców zawiera cegiełki budujące historię naszej uczelni. Koło Naukowe Mostowców jest dumne z bycia częścią i wspólnego świętowania 200-letniego jubileuszu istnienia Wydziału Inżynierii Łądowej i Politechniki Warszawskiej.

# Interdyscyplinarne projekty Międzywydziałowego Koła Naukowego Smart City na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej

Interdisciplinary projects of the Interdepartmental Smart City Research Club at the Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology

inż. Karol Duszczyk (ORCID: 0009-0009-8590-9822), Bartosz Bagiński (ORCID: 0009-0005-3134-4388) – student PW, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska, Bartosz Jaworski (ORCID: 0009-0009-7769-8164) – student, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, inż. Natalia Kaniecka (ORCID: 0009-0002-3470-4789), Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska, inż. Jakub Romański (ORCID: 0009-0009-3483-8235), Wydział Mechatroniki, Politechnika Warszawska, Izabella Wątor (ORCID: 0009-0005-2096-3335) – studentka, Dorota Wolińska (ORCID: 0009-0000-6050-1921) – studentka, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7432

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia działalność Międzywydziałowego Koła Naukowego Smart City Politechniki Warszawskiej. Celem pracy jest ukazanie, jak interdyscyplinarna współpraca studentów z różnych wydziałów pozwala na rozwiązywanie współczesnych problemów miejskich. W tekście omówiono kluczowe projekty realizowane aktualnie przez Koło: koncepcję rewitalizacji przestrzeni uczelnianej, narzędzie do analizy barier architektonicznych dla osób z niepełnosprawnościami, budowę laboratorium Internetu Rzeczy (IoT) dla inteligentnych budynków, projekt niezależnej aplikacji taksówkarskiej, organizację konferencji łączącej świat akademicki z biznesem oraz think tank analizujący problemy miast. Przeprowadzone działania potwierdzają wniosek, że łączenie kompetencji z wielu dziedzin technicznych ułatwia tworzenie innowacji. Taki model współpracy skutecznie przygotowuje przyszłych inżynierów do wdrażania realnych rozwiązań na rzecz inteligentnych miast.

**Słowa kluczowe:** inteligentne miasta, koło naukowe, interdyscyplinarność, studenci.

**Abstract:** This article presents the activities of the Interdepartmental Smart City Research Club at the Warsaw University of Technology. The aim of this paper is to demonstrate how interdisciplinary collaboration among students from different departments enables the resolution of contemporary urban challenges. The text discusses key projects currently being carried out by the Club: a concept for revitalizing the university campus, a tool for analyzing architectural barriers for people with disabilities, the construction of an Internet of Things (IoT) laboratory for smart buildings, a project for an independent taxi app, the organization of a conference connecting the academic world with business, and a think tank analyzing urban issues. The activities carried out confirm the conclusion that combining expertise from multiple technical fields facilitates innovation. Such a model of collaboration effectively prepares future engineers to implement real-world solutions for smart cities.

**Keywords:** smart cities, research club, interdisciplinarity, students.

## 1. Wprowadzenie

Międzywydziałowe Koło Naukowe Smart City (MKNSC) powstało w 2016 roku przy Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej i od tamtego czasu zrzesza studentów różnych wydziałów, realizując interdyscyplinarne projekty związane z inteligentnymi miastami. Obecnie MKNSC opiekuje się dr inż. Paweł Nowak, adiunkt na WIL PW, a aktualnie w kole działa 37 osób z 8 różnych wydziałów PW: Inżynierii Lądowej, Elektroniki i Technik Informacyjnych, Geodezji i Kartografii, Elektrycznego,

Mechatroniki, Transportu, Inżynierii Środowiska oraz Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa.

Koło realizuje projekty badawczo-rozwojowe, których zakres obejmuje projektowanie oprogramowania, budowę fizycznych makiet i systemów IoT, a także prowadzenie analiz literaturowych i badań ankietowych. Integralną częścią tych działań jest stała popularyzacja



**Rys. 1.** Logo Koła MKNSC

nauki i rozwiązań z obszaru smart city, poprzez uczestnictwo w wydarzeniach naukowych i targach branżowych oraz organizację własnych wydarzeń popularno-naukowych. W kolejnych rozdzielach zaprezentowano niektóre z aktualnie realizowanych przez koło projektów.

## 2. Planowanie przestrzenne

W projekcie „Planowanie przestrzenne” zespół zajmuje się koncepcyjnym planem nowego zagospodarowania terenu parkingu pomiędzy wydziałami Inżynierii Lądowej oraz Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Projekt rozpoczęto od rozpoznania problemu poprzez przeprowadzenie ankiety wśród studentów obu wydziałów – 71,2% ankietowanych uważa, że teren ten powinien ulec przebudowie. W pytaniu o przykładowe propozycje zagospodarowania terenu, najczęstszymi odpowiedziami były kolejno: przestrzeń do relaksu, tereny zielone, odnowiony parking. Co więcej, 92,4% ankietowanych zgadza się, że zrewitalizowany teren wpłynąłby pozytywnie na wizerunek wydziałów oraz uczelni. Warto zwrócić uwagę na to, że część przestrzeni pomiędzy wydziałami pozostaje stale niewykorzystana, a niektóre z miejsc parkingowych bardzo rzadko zajmowane są przez pojazdy.



**Rys. 2.** Członkowie projektu pracujący nad makietą

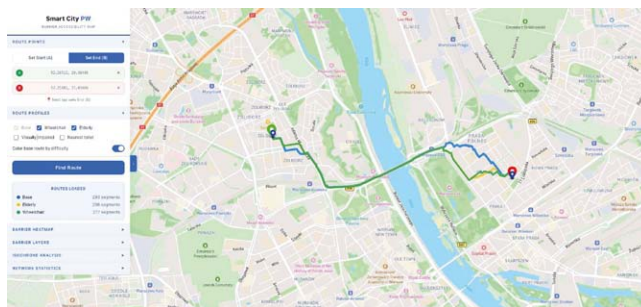
W projekcie postanowiono przekształcić jedynie fragment parkingu tak, aby teren, będąc nową przestrzenią nie tylko do nauki na świeżym powietrzu, ale także wspólnego spędzania wolnego czasu, mógł jednocześnie pełnić swoją starą funkcję. Efektem projektu będą komputerowa wizualizacja 3D oraz rzeczywista makietka, nad którą obecnie trwają prace. Już niedługo będzie można zobaczyć koncepcję terenu przeznaczonego w szczególności dla studentów, ale i wszystkich tych, którzy chcieliby spędzić czas na wolnym powietrzu – nie zabraknie leżaków, altanek, hamaków, poidełek, a nawet krytej rowerowni. Celem projektu jest pokazanie, że nawet nieduże obszary można przekształcić w przestrzeń przyjazną ludziom i środowisku.

## 3. Bariery przestrzenne

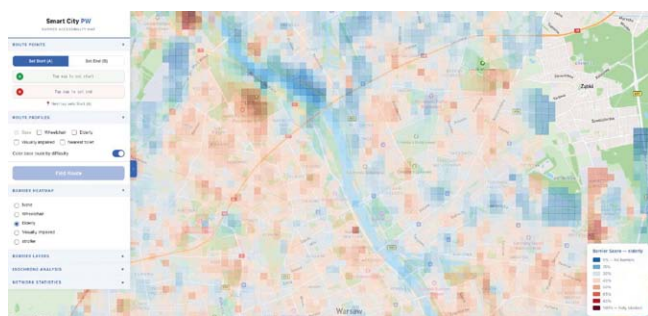
Współczesne systemy informacji przestrzennej wykorzystywane w analizach miejskich koncentrują się przede wszystkim

na ruchu pojazdów, co znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w zakresie i szczegółowości danych udostępnianych przez popularne portale mapowe. Podczas gdy dane o ruchu kołowym są powszechnie dostępne, informacje o infrastrukturze pieszej pozostają fragmentaryczne i niekompletne. Ten brak danych stanowi kluczową barierę w planowaniu transportu i egzekwowaniu standardów dostępności, co bezpośrednio uderza w mobilność osób z niepełnosprawnościami [1]. Projekt badawczy „Bariery Przestrzenne” stanowi próbę oceny możliwości wykorzystania otwartych danych przestrzennych do analiz sieciowych zorientowanych na ruch pieszy, uwzględniających zróżnicowane potrzeby użytkowników. Podstawowym źródłem danych wykorzystanym w badaniu była baza OpenStreetMap, stanowiąca jeden z najważniejszych przykładów oddolnie tworzonej, globalnej infrastruktury danych przestrzennych, a jako obszar badawczy wybrano miasto Warszawa.

Kluczowym elementem projektu było zdefiniowanie czterech reprezentatywnych użytkowników (tzw. person), które odzwierciedlają różne typy ograniczeń: osoby poruszające się na wózkach inwalidzkich, osoby starsze o obniżonej sprawności ruchowej, opiekunowie z niemowlętami w wózkach, osoby z zaburzeniami widzenia. Dla każdej z wyróżnionych grup zidentyfikowano elementy zagospodarowania przestrzeni, które mogą stanowić potencjalne bariery w przemieszczaniu się. Analizie poddano między innymi rodzaje nawierzchni, ukształtowanie terenu oraz elementy infrastruktury ulicznej. Dostępne badania wykazały bowiem, że nawierzchnie o charakterze grząskim lub nierównym, takie jak żwir, piasek czy bruk kamienny („kocie łby”), istotnie obniżają komfort i bezpieczeństwo poruszania się, podczas gdy nawierzchnie wykonane z dużych, równych płyt są preferowane przez większość użytkowników [2]. Podobnej ocenie poddano również schody, podjazdy, przejścia dla pieszych oraz inne elementy infrastruktury. Każdemu z nich przypisano wagi odzwierciedlające stopień ich uciążliwości, co umożliwiło uwzględnienie zróżnicowanych potrzeb użytkowników w analizach sieciowych. Wynikiem analiz jest narzędzie pozwalające na znalezienie najdogodniejszej drogi w przestrzeni miejskiej w zależności od wybranej osoby (rys. 3). Rozwiązanie to wskazuje także lokalizację barier architektonicznych oraz przedstawia rozkład uciążliwości ruchu w formie mapy intensywności w siatce kwadratów (rys. 4).



**Rys. 3.** Algorytm wyszukujący najkrótszą trasę między dwoma punktami dla danych grup użytkowników (zrzut ekranu z opracowanego narzędzia)



**Rys. 4.** Mapa ciepłna dostępności dla danej grupy użytkowników (zrzut ekranu z opracowanego narzędzia)

Istotnym ograniczeniem przeprowadzonych analiz jest jakość i kompletność danych źródłowych. Szacuje się, że poziom kompletności danych OpenStreetMap w centrach miast europejskich wynosi około 71%, przy czym znaczna część informacji jest efektem aktualizacji dokonywanych przez użytkowników [3]. Oznacza to, że wiarygodność i szczegółowość danych mogą być zróżnicowane przestrzennie. W związku z powyższym, kolejnym etapem badań będzie przeprowadzenie weryfikacji terenowej na wybranym obszarze miasta Warszawy.

#### 4. Engineering Think Tank

Na początku obecnego roku akademickiego swoją działalność w kole zainaugurował inżynierski think tank, studencka grupa dążąca do popularyzacji wśród naukowców dziedzin inżynierijno-technicznych metody pogłębianych, niezależnych badań własnych, w stylu typowym dla nauk społecznych i politycznych. Celem grupy jest zbadanie rozbieżności między etapem planowania i przygotowania do podjęcia się danego przedsięwzięcia a jego faktyczną realizacją, nierzadko wynikającą z nieodpowiednio dobranej skali zarządzania projektem i braku działań prewencyjnych wobec potencjalnych czynników ryzyka. Działając pod hasłem „Od strategii do realizacji”, grupa aktualnie opiera się na dwóch zespołach, badających przykładowe inwestycje odpowiednio w skali mikro i makro oraz przygotowujących na ich podstawie własny artykuł. W skali lokalnej zespół przeprowadza studium miasta Pleszewa, identyfikującego się jako pierwsze w Polsce miasto 15-minutowe [4–6] oraz podejmującego liczne działania na rzecz usprawnienia codziennego życia mieszkańców. Autorzy stawiają hipotezę, iż na coraz bardziej dotkliwe dla Polski zjawisko wyludniania się mniejszych miejscowości wpływ ma nie tylko oferowana przez nie perspektywa, lecz również sam sposób zaplanowania składającej się na nie przestrzeni. Szerszym spojrzeniem grupa objęła również zagadnienie budowy sieci kolei dużych prędkości w Polsce w celu analizy potencjalnych przyczyn zaburzenia naturalnego rytmu działania inwestycyjnego. W skali makro niezbędne jest szczegółowe zbadanie czynników społeczno-politycznych, w tym motywowanych różnymi czynnikami protestów wobec danej idei. Kluczowe znaczenie ma dokładność szacunku kosztów względem popytu na efekt projektu, z czym zderzyli się m.in. twórcy sieci HSR we Włoszech i Francji [7], a co dodatkowo jest potwierdzone

w literaturze nt. licznych projektów transportowych większego kalibru [8]. W zagadnieniu rozwijanym w naszym kraju już od ponad trzydziestu lat dostrzeżono liczne błędy na etapie tworzenia planów działania, skutkujące koniecznością wielokrotnej rewizji projektu oraz, po licznych korektach założeń, doprowadzeniem go do obecnej postaci w kształcie litery „Y”. Całość badań złoży się na szerszą publikację, łączącą wiedzę o społeczeństwie i demografii z inżynierskim podejściem do planowania przestrzennego i zarządzania środowiskiem miejskim.

#### 5. Focus on Cities Conference

W 2026 r. koło organizuje międzynarodową konferencję naukową Focus on Cities, mającą na celu interdyscyplinarne poruszenie zagadnień z dziedziny smart city oraz opracowanie szczególnie potrzebnego w tych tematach łącznika nauki z biznesem. Konferencja odbędzie się 28 i 29 maja 2026 r. w Gmachu Głównym SGH, przy alei Niepodległości 162. Koło nawiązało współpracę z dwiema innymi organizacjami studenckimi – Kołem Naukowym Gospodarki Przestrzennej z GiK PW oraz SKN Transportu i Mobilności z SGH.

**Rys. 5.** Logo konferencji Focus on Cities



Konferencja ugości studentów, doktorantów i naukowców chętnych do zabrania głosu w języku angielskim nad jednym z czterech tematów, do których można zgłaszać swoje wystąpienia. Panelowe tematy dotyczą odpowiednio technologii, ekologii, polityki publicznej oraz dostępności architektonicznej i cyfrowej. W ramach eventu przewiduje się również dyskusje podsumowujące z udziałem panelistów ze świata przedsiębiorczości i nauki, tak, aby stworzyć aktywną przestrzeń do wdrażania w życie wyników i pomysłów zaprezentowanych jeszcze przed chwilą na scenie akademickiej. Więcej informacji o konferencji można znaleźć na stronie internetowej <https://focusoncities.edu.pl/>

**Rys. 6.** Kod QR do strony konferencji



#### 6. Laboratorium Smart Domu i Miasta

W 2025 r. koło otrzymało Grant Rektorski na realizację laboratorium prezentującego rozwiązania stosowane w inteligentnym domu, mieście czy też na terenach budów [9, 10]. Tworzone aktualnie laboratorium jest połączeniem demonstracyjnego pokoju prezentującego nowoczesny ekosystem inteligentnego domu oraz laboratorium, w którym studenci mogą eksperymentować, tworzyć własne inteligentne czujniki i dodawać je do przygotowanej infrastruktury.

Laboratorium ma infrastrukturę sieciową do testowania różnych protokołów komunikacji przewodowej i bezprzewodowej (m.in. LoRaWAN, ZigBee, BLE, Matter), kilkadziesiąt czujników

i elementów wykonawczych od różnych producentów, wykorzystywanych w inteligentnych domach i miastach (m.in. czujniki środowiskowe, sterowniki rolet, inteligentne oświetlenie) oraz serwer z oprogramowaniem pozwalającym na łatwe zarządzanie czujnikami i projektowanie zależności. Przykładowym stanowiskiem jest automatyczne sterowanie otwarciem okna oraz roletą na podstawie pomiarów z czujników jakości powietrza i temperatury w pomieszczeniu, nasłonecznienia i warunków pogodowych [11, 12]. Innym przykładem jest stanowisko prezentujące czujniki zajętości miejsca postojowego o różnym sposobie montażu (wymagającym lub niewymagającym ingerencji w powierzchnię parkingu) oraz różnym sposobie komunikacji z serwerem. Laboratorium ma charakter interdyscyplinarny. Mogą z niego korzystać zarówno studenci związani z elektroniką i programowaniem, przygotowując własne czujniki i sieć, ale także studenci budownictwa i architektury, którzy mogą eksperymentować ze stosowaniem inteligentnych czujników w nowoprojektowanych domach i budynkach użyteczności publicznej. Laboratorium jest przestrzenią, w której każdy może nauczyć się projektować i wdrażać systemy inteligentnego domu i miasta oparte na rozwiązaniach otwartoźródłowych, niezależnych od jednego producenta, w przystępnych cenach.

## 7. Free the Taxi

Obecna sytuacja na rynku taksówkarskim nie spełnia oczekiwań ani osób świadczących te usługi, ani korzystających z nich, zwłaszcza w mniejszych miejscowościach. W dużych miejscowościach postępuje oligopolizacja rynku wokół kilku głównych dostawców usług przewozów na telefon, wymuszając wojnę cenową poprzez dumpingowe praktyki, którym nie są w stanie sprostać prywatni taksówkarze niezrzeszeni w dużych korporacjach [13]. Dodatkowo szerokim echem odbijają się przypadki niewystarczającej kontroli kierowców dołączających do takich aplikacji, co skutkuje podwyższonym ryzykiem dla kierowców i innych użytkowników dróg, a także wymuszanie pracy na kierowcach poprzez limitowanie liczby oferowanych im kursów po zwolnieniach chorobowych lub urlopach. Z perspektywy klienta natomiast, wygodna usługa taksówek zamawianych przez aplikację jest dostępna tylko w szeregu dużych miast, pozostawiając niewielkie miejscowości i wsie bez takiej opcji, co dla turystów lub osób potrzebujących zamówić taksówkę w nowym miejscu skutkuje często problematycznymi, niezręcznymi sytuacjami. Celem projektu „Free the taxi” jest opracowanie społecznego, niezależnego od korporacji i nastawionego na działanie w mniejszych miejscowościach sposobu zamawiania taksówek przez aplikację w telefonie, z uwzględnieniem maksymalnej prostoty korzystania z aplikacji (wielu taksówkarzy i klientów to osoby starsze, preferujące intuicyjne i łatwe w obsłudze interfejsy). Końcowym wynikiem projektu będzie cyfrowa „tablica ogłoszeń”, na której niezależni taksówkarze widoczni będą jako punkty na mapie, bez algorytmów i sowitych premii pobieranych od każdego kursu przez korporację, z umożliwieniem komunikacji poprzez wyświetlenie numeru telefonu do kierowcy

po wybraniu go na mapie. Infrastruktura systemu byłaby utrzymywana ze stałych opłat abonamentowych od taksówkarzy, bez prowizji od każdego kursu ani narzucania konkretnych cen. Jednocześnie kluczowy jest aspekt bezpieczeństwa i legalności pracy kierowców. Aplikacja będzie pozwalała klientowi weryfikować legalność uprawnień taksówkarza i stan techniczny pojazdu.

## 8. Podsumowanie

W artykule przedstawiono sześć projektów realizowanych aktualnie przez Międzywydziałowe Koło Naukowe Smart City na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Koło realizuje interdyscyplinarne projekty, pozwalając studentom na rozwijanie swoich zainteresowań związanych z inteligentnymi miastami, niezależnie od wydziału, na którym studiuje. Takie podejście pozwala rozwiązywać skomplikowane problemy współczesnych miast i przygotowuje przyszłych inżynierów do pracy w realnych warunkach. Zapraszamy też czytelnika do zapoznania się z innymi, zrealizowanymi już w przeszłości, projektami MKNSC, takimi jak: „Sierpc 2.0” [1] oraz „LIFT” [15]. Działania koła na bieżąco są opisywane na stronie w serwisie Facebook pod adresem <https://www.facebook.com/smartcitypw>.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Domagalski M., Łęcki W., Nowak P., Wiktorzak B., Prospołeczne projekty naukowe realizowane na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, *Budownictwo i Prawo* 4/2021, str. 46–47
- [2] Mazurkiewicz M., Mikos D., Cywiński M., Bluszcz D., Różycka M., Marciniak-Kujawa A., Determinants of the Development of Traditional Taxi Services, *European Research Studies Journal*, 2025, str. 1851–1874
- [3] Herfort B., Lautenbach S., Porto de Albuquerque J., Anderson J., Zipf A., A spatio-temporal analysis investigating completeness and inequalities of global urban building data in OpenStreetMap, *Nature Communications* 14, 2023, art. 3985
- [4] Kowalski K., Włócznik 2.0, 2 ed., Warszawa: Fundacja Integracja, 2024
- [5] Askari S., Snyder D., Li C., Saugstad M., Froehlich J. E., Eisenberg Y., Validating Pedestrian Infrastructure Data: How Well Do Street-View Imagery Audits Compare to Government Field Data? *Urban Science* 9/2025, str. 130
- [6] Jong M. D., Annema J. A., Wee G. P. V., How to Build Major Transport Infrastructure Projects within Budget, in Time and with the Expected Output; a Literature Review, *Transport Reviews* 33, 2/2013, str. 195–218
- [7] Pozoukidou G., Angelidou M., Urban Planning in the 15-Minute City: Revisited under Sustainable and Smart City Developments until 2030, *Smart Cities* 5, 4/2022, str. 1356–1375
- [8] Bruzzone F., Cavallaro F., Nocera S., Construction Costs of High-Speed Railways: A Comparison of France and Italy, 2023
- [9] Domagalski M., Jastrzębiec-Jankowski J., Nowak P., Szewczuk G., Wiktorzak B., Aplikacja LIFT dla Warszawskiego Metra – pomoc w nawigacji wewnątrzobiektywnej, *Budownictwo i Prawo*, 2025
- [10] Nowak P., Książek M., Draps M., Zawistowski J., Decision making with use of building information modeling, *Procedia Engineering* 153, 2016, str. 519–526
- [11] Böde K., Różycka A., Nowak P., Development of a pragmatic IT concept for a construction company, *Sustainability* 12/2020, art. 7142
- [12] Kuna J., d’Obyrn M., Nowak P., Romański J., Czy warto zamieszkać w mieście 15-minutowym? Część I. Wprowadzenie, *Przegląd Budowlany* 7/2024, str. 100–103
- [13] J. Kuna, M. d’Obyrn, P. Nowak and J. Romański, Czy warto zamieszkać w mieście 15-minutowym? Część II. Wyniki badań, *Przegląd Budowlany* 5/2025, str. 188–191
- [14] Nowak P., Rosłon J., Romatowski K., Wykorzystanie skaningu laserowego i chmur punktów na budowie. Część IV, *Przegląd Budowlany* 3/2024, str. 66–74
- [15] Klepacz K., Książek-Nowak M. V., Nicał A. K., Nowak P., Rosłon J., Drony w budowlanych przedsięwzięciach inwestycyjnych. Część I. Wprowadzenie i aspekty prawne, *Przegląd Budowlany* 7/2024, str. 184–188

# Koło Naukowe BIMgo – od początku i od środka, a zatacza coraz większe kręgi

dr inż. Ireneusz Czmocho (ORCID: 0000-0002-5818-3781), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, dr inż. arch. Emilia Dudzińska (ORCID: 0000-0003-0201-8514), Wydział Architektury, Politechnika Warszawska, Kamil Grzebalski, Arup Polska, Krzysztof Kaczor (ORCID: 0009-0002-6413-5249), PacketFront Software Solutions Poland, Weronika Kowal-Szabelska, Arup Polska, Jakub Milczarek, Warsaw Projekt sp. z o.o, Michał Nowakowski (ORCID: 0009-0000-3804-3127), WARBUD S.A., Jakub Walenzik (ORCID: 0000-0001-5931-0140)

## 1. Wprowadzenie

**Dr inż. Ireneusz Czmocho – opiekun koła naukowego BIMgo, koordynator przedmiotu mpiBIM w ramach WIL PW, kierownik międzywydziałowych studiów podyplomowych interdyscyplinary BIM.**

Koło naukowe BIMgo powstało na początku października 2016 r., trzy miesiące po zakończeniu kursu „Informatyka 2 – Wstęp do BIM” według nowego programu zajęć pt.: „Cyfrowe budownictwo ogólne”, którego celem była nauka poprawnego modelowania BIM w programie Revit, tzn. model ten ma odzwierciedlać realną strukturę budynku – ściany mają poprawne ustawienie warstw i są modelowane między poziomami, a stropy opierają się na warstwie nośnej ściany.

Entuzjazm założycieli Koła Naukowego BIMgo, Weroniki, Michała i Krzysztofa, był inspirujący do dalszych wspólnych działań i kształcenia. Wkrótce objawiła się grupa studentów zainteresowanych samokształceniem, uczestnictwem w konferencjach BIM-owych, pracy nad realnymi modelami i zadaniami. W telegraficznym skrócie wymienię kilka działań KN BIMgo – w których członkowie koła brali udział lub pomogli je zorganizować: warsztaty z zaawansowanego Revita zorganizowane przy współpracy z AEC Design (marzec 2017 r.), udział w konferencji „BIM w edukacji” na Politechnice Krakowskiej (maj 2017 r., maj 2018 r.), kurs modelowania w p. Archicad zorganizowany w Laskach pod Warszawą (wspólny wyjazd integracyjny, wrzesień 2017 r.), Konferencja „BIM w teorii i w praktyce”, zorganizowana przeze mnie ze wsparciem dziekana WIL (październik 2017 r. w sali konferencyjnej CZliTT), kurs programowania wizualnego Grasshopper oraz kontroli jakości modeli z pomocą Solibri zorganizowany w Laskach (wspólny wyjazd, wrzesień 2019 r.).

Bardzo ważnym impulsem dla rozwoju koła BIMgo był start w październiku 2017 r. 1. edycji innowacyjnego przedmiotu „międzywydziałowy projekt interdyscyplinary BIM” (<https://mpi.bim.pw.edu.pl/>). Studenci z Wydziałów: Architektury, Inżynierii Lądowej, Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii

Środowiska, Elektrycznego i Zarządzania utworzyli wielobranżowe zespoły projektowe, które opracowywały projekty na terenie centralnego kampusu PW. Zasadniczym celem zajęć było rozwijanie umiejętności współpracy i komunikacji w zespole interdyscyplinarnym, korzystając z informatycznych narzędzi modelowania BIM i wymiany informacji. Członkowie koła stanowili większość uczestników tego projektu ze strony WIL przez kilka kolejnych edycji. W styczniu 2026 r. zakończyła się 9. edycja mpiBIM przygotowaniem projektu „Międzywydziałowego Centrum Badań Interdyscyplinarnych”.

Dużym wydarzeniem były trzecie urodziny KN BIMgo zorganizowane w CZliTT, 5 grudnia 2019 r. Była część oficjalna z udziałem dziekana WIL, prof. Andrzeja Garbacza, bardzo interesująca prezentacja dorobku i osiągnięć członków koła oraz duży tort urodzinowy dla ok. 50 gości. Niestety okres pandemii COVID, który rozpoczął się trzy miesiące później, wpłynął negatywnie na aktywność koła. Mimo niesprzyjających okoliczności były podejmowane próby samokształcenia w trybie on-line „szkółki niedzielnej”, np. z programowania wizualnego Grasshopper. Po okresie osłabienia aktywności, począwszy od 2025 r.



Wspólne zdjęcie członków KN BIMgo (listopad 2019 r.)

nowi członkowie podejmują próby reanimacji koła. Uczestniczą w konferencjach, przygotowują się do udziału w pikniku naukowym, organizują zajęcia samokształceniowe.

Przez KN BIMgo przewinęło się dziesiątki osób, część z nich intensywnie korzysta z narzędzi i technik BIM w praktyce zawodowej; niektórzy, pod wpływem poznania zastosowań informatyki w budownictwie, zmienili profil zawodowy – stali się informatykami.

Najlepiej niech przemówią świadectwa byłych członków Koła Naukowego BIMgo. Z uwagi na ograniczony zakres artykułu przedstawiamy wypowiedzi kilku osób. Osoby pominięte niech nie czują się poszkodowane. Wszystkich członków KN BIMgo cenię i miło wspominam. Daję temu wyraz, jak tylko spotkamy się na konferencji lub spotkaniach branżowych, gdy nasze drogi się przecinają.

## 2. Wypowiedzi założycieli i członków KN BIMgo

### Weronika Kowal-Szabelska – założyciel i członek zarządu Koła Naukowego BIMgo w latach 2016–2020

Koło naukowe BIMgo powstało z ciekawości i naturalnej chęci robienia podczas studiów czegoś więcej niż tylko realizowanie programu zajęć. Razem z grupą kolegów zauważyliśmy, że temat BIMu praktycznie nie funkcjonował jeszcze na Politechnice Warszawskiej, a jednocześnie coraz wyraźniej pojawiał się w praktyce projektowej. Chcieliśmy lepiej zrozumieć nowe narzędzia i nauczyć się ich w praktyce. Tak narodził się pomysł założenia KN BIMgo – oddolnie, z entuzjazmu i potrzeby działania. Dla mnie działalność w kole była jednym z najważniejszych doświadczeń ze studiów. Oprócz zdobywania twardych umiejętności, takich jak praca w różnych programach BIM, ogromnie istotne były także kompetencje miękkie. Zachęcaliśmy innych do nauki narzędzi i dzieliliśmy się wiedzą, organizując warsztaty – również wyjazdowe – co dawało dużą satysfakcję i poczucie realnego wpływu. Równoległe uczyliśmy się prezentować działalność koła, współpracować z przedstawicielami firm oraz pozyskiwać partnerów dla organizowanych wydarzeń. Była to praktyczna szkoła komunikacji, współpracy i odpowiedzialności.

Dzięki BIMgo mieliśmy także bezpośredni kontakt ze środowiskiem BIM – poprzez spotkania z praktykami i udział w wydarzeniach branżowych. Jedno z nich okazało się dla mnie szczególnie ważne: podczas warsztatów organizowanych przez SARP, na które zostałam zaproszona jako przedstawicielka środowiska akademickiego, poznałam osobę, dzięki której trafiłam do firmy, w której pracuję do dziś – już od siedmiu lat.

Choć zawodowo pracuję jako projektant konstrukcji i nie zajmuję się bezpośrednio koordynacją BIM ani modelowaniem, uważam, że doświadczenie zdobyte w kole bardzo pomogło mi odnaleźć się w pracy projektowej. Na początku kariery zajmowałam się także modelowaniem i automatyzacją procesów – umiejętnościami rozwijanymi właśnie w BIMgo. Do dziś w projektowaniu często wykorzystuję m.in. programowanie wizualne, które pozwala mi optymalizować rozwiązania

i usprawniać powtarzalne zadania. Znajomość narzędzi do modelowania znacząco ułatwia mi także pracę, zarówno na etapie koncepcji, jak i dalszych analiz projektowych. Poza twardymi umiejętnościami, jeszcze ważniejsze okazało się jednak rozwinięcie ciekawości i otwartości, które zawdzięczam działalności w kole naukowym BIMgo.

### Krzysztof Kaczor – założyciel i członek zarządu Koła Naukowego BIMgo w latach 2016–2020

Koło naukowe zakładaliśmy razem z Weroniką i Michałem. Dziś myślę o tamtym czasie z dużym sentymentem. Na początku nie miałem przekonania, że wchodzimy w coś przełomowego, gdyż trudno było mi sobie wyobrazić, jak BIM naprawdę miałby znaleźć szerokie zastosowanie w budownictwie. Branża wydawała mi się wręcz odporna na zmianę.

Jednak po około 1,5 roku od założenia koła wzięliśmy udział w wyjątkowej prezentacji Buro Happold, specjalnie przygotowanej dla nas. Zobaczyliśmy modele parametryczne różnych konstrukcji, które nie były koncepcją czy akademickim ćwiczeniem, ale projektami w realizacji albo już zrealizowanymi. Pamiętam bardzo wyraźnie to uczucie: ekscytację, zaskoczenie i rosnące przekonanie, że budownictwo ma przed sobą jeszcze jedno fascynujące oblicze.

Z czasem równie ważne jak sam temat stali się ludzie. Wokół koła zaczęła powoli tworzyć się paczka znajomych. Każdy przyszedł do tego miejsca z trochę inną motywacją. Jedni bardziej interesowali się projektowaniem, inni technologią, jeszcze inni organizacją, współpracą z firmami czy praktycznym zastosowaniem BIM-u w różnych obszarach budownictwa. Wszystkich łączyło jedno – chęć pracy, rozwoju i zrobienia czegoś więcej, niż tylko uczestniczenia w zajęciach i zaliczania kolejnych semestrów.

Koło zaczęło rozwijać się bardzo szybko. Ogromne znaczenie miało tu wsparcie naszego opiekuna koła, dr. Ireneusza Czmocha, oraz dziekana wydziału, prof. Andrzeja Garbacza. Ich rozległe kontakty w świecie biznesu bardzo nam pomogły i otworzyły przed nami wiele drzwi. Nawiązaliśmy współpracę z firmami z branży budowlanej. W pewnym momencie przestaliśmy być tylko grupą studentów, których się szkoli. Dostaliśmy zadania, które miały realną wartość, były ważne dla naszych partnerów. To był moment, który bardzo mocno zapadł mi w pamięć, bo właśnie wtedy poczułem, że to wszystko nabiera innego ciężaru.

Dziś, dziesięć lat później, zostałem software developerem i choć od czterech lat nie pracuję bezpośrednio w branży budowlanej, nadal pozostaję z nią w kontakcie. W miarę możliwości angażuję się także w projekty programistyczne, dzięki którym mam poczucie, że nie odszedłem od budownictwa. Rozwijam się w sposób, który być może w przyszłości pozwoli mi wrócić do budownictwa. Im więcej czasu mija, tym mocniej widzę, jak KN BIMgo miało duży wpływ na moje decyzje. To wtedy pojawiła się we mnie motywacja, by rozwijać cyfrowe kompetencje, żeby ulepszać, porządkować, budować mądrzej.

### **Michał Nowakowski – założyciel i członek zarządu Koła Naukowego BIMgo w latach 2016–2020**

Moja działalność zawodowa dobrze oddaje idee, które od początku przyświecały działalności Koła Naukowego BIMgo – łączenie wiedzy technicznej, innowacji i praktycznego zastosowania nowoczesnych narzędzi w budownictwie.

Początkowo pracowałem w biurze projektowym, gdzie zajmowałem się obiektami kubaturowymi, a moim głównym obszarem działań była automatyzacja procesu przygotowania dokumentacji budowlanej i wykonawczej na podstawie modeli BIM.

Kolejnym etapem mojej kariery była praca u generalnego wykonawcy – w firmie Warbud – gdzie rozwijałem kompetencje w zakresie szeroko rozumianego BIM-u, uczestnicząc w realizacjach wymagających przedsięwzięć, takich jak: Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Warszawie, oddział szpitala w Otwocku, Teatr Rozmaitości w Warszawie, Skyliner II w Warszawie, czy projekt wanny szczelnej pod Południową Obwodnicą Warszawy, obejmujący przygotowanie skomplikowanej geometrii przejazdu. Bardzo cennym doświadczeniem był udział w całym procesie realizacji Aquaparku w Płocku w formule PPP – od etapu koncepcji, przez przygotowanie dokumentacji wykonawczej, wykorzystanie BIM-u na budowie, aż po udostępnienie danych na potrzeby facility management, w tym wizualizacje, zdjęcia 360° oraz skanowanie laserowe.

Wraz z rozwojem zawodowym coraz większą rolę w mojej pracy odgrywało programowanie – od skryptów tworzonych w Dynamo, przez programy w Pythonie, aż po tworzenie i aktualizacje wewnętrznej wtyczki firmowej do Revita. Dodatkowo zajmuję się standaryzacją pracy, doradztwem i prowadzeniem szkoleń BIM-owych. Prowadzę także zajęcia z Revita na Politechnice Warszawskiej, zarówno na poziomie podstawowym na studiach inżynierskich, jak i na poziomie zaawansowanym na międzywydziałowych studiach podyplomowych interdyscyplinary BIM.

### **Emilia Dudzińska, członek Koła Naukowego BIMgo w latach 2018–2024**

Moja przygoda z Kołem Naukowym BIMgo rozpoczęła się w 2018 roku, kiedy byłam na etapie studiów doktoranckich na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskiej. Od zawsze fascynowało mnie to, co dzieje się na styku technologii i projektowania. Podczas studiów inżynierskich i magisterskich pasjonowało mnie zgłębianie możliwości oprogramowania Revit oraz poszukiwanie efektywnych metod pracy w technologii BIM. Dołączenie do KN BIMgo było naturalnym krokiem, by tę pasję rozwijać w gronie osób o podobnych zainteresowaniach.

Aktywność w kole była dla mnie czymś znacznie więcej niż tylko nauką narzędzi. To przede wszystkim platforma wymiany doświadczeń i poznawania różnorodnych perspektyw. Miałam okazję brać udział w ambitnych projektach i angażowałam się w prowadzenie szkoleń, w tym tych współorganizowanych z kołami naukowymi z innych wydziałów. Te działania stały się jednym z fundamentów mojej dzisiejszej pracy zawodowej i dydaktycznej.

Obecnie moja kariera zawodowa jest nierozdzielnie związana z technologiami cyfrowymi. Jako BIM Manager w pracowni Trzop Architektki odpowiadam za opracowywanie standardów i wspieranie zespołów projektowych, a także za wdrażanie innowacji i automatyzację zadań przy użyciu m.in. Dynamo oraz Python. Równolegle realizuję się w pracy naukowo-dydaktycznej jako adiunkt na Wydziale Architektury Politechniki Warszawskiej. Prowadzę zajęcia z modelowania komputerowego BIM, starając się zaszczepić w studentach zainteresowanie wykorzystaniem nowych technologii w architekturze. Mam przyjemność także współprowadzić zajęcia na międzywydziałowych studiach podyplomowych „Interdyscyplinary BIM”, realizowanych wspólnie przez Wydziały Architektury i Inżynierii Lądowej. Jako członek indywidualny buildingSMART Polska uczestniczę w inicjatywach związanych z openBIM.



*Arch. Paweł Przybyłowicz szkoli studentów w Laskach koło Warszawy (wrzesień 2019 r.)*

Z perspektywy czasu widzę, że udział w KN BIMgo był dla mnie silnym impulsem, który pozwolił mi kontynuować pasję do innowacji i wyposażył mnie w kompetencje niezbędne na rynku pracy. Największą wartością pozostają jednak relacje – do dziś z ogromną radością spotykam dawnych kolegów i koleżanki z koła na konferencjach branżowych.

### **Jakub Milczarek, członek Koła Naukowego BIMgo w latach 2017–2020**

Moja przygoda z Wydziałem Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej trwała w latach 2016–2022. Kluczowym momentem moich studiów na Wydziale Inżynierii Lądowej PW było przystąpienie do Koła Naukowego BIMgo, do którego paradoksalnie trafiłem przypadkiem. Idąc na spotkanie rekrutacyjne, nie wiedziałem do końca, co znaczą te trzy litery. Pierwszym moim wydarzeniem w ramach koła było przygotowanie Pikniku Naukowego Polskiego Radia na Stadionie Narodowym, kierowanego głównie do dzieci i ich rodziców. Próbuąc wyjaśnić, jak działa skaning laserowy i fotogrametria budynków, przygotowaliśmy pokaz skanowania prostej bryły, przypominającej Pałac Kultury, zbudowanej z klocków Lego.

Wszystko za pomocą kamery używanej do grania na jednej z konsol. Dzięki użyciu powszechnego sprzętu dzieci mogły lepiej zrozumieć, jak powstają prezentowane modele chmur punktów istniejących budynków.

Przez lata aktywności przeszedłem drogę od uczestnika szkoleń i konferencji promowanych przez Koło, poprzez organizatora ogólnowidziałowych warsztatów i konferencji, po prowadzącego zajęcia. Koło stało się dla mnie pomostem między teorią a praktyką, umożliwiając bezpośredni kontakt z liderami branży, którzy zaczęli wdrażać technologie cyfrowe w budownictwie. Pamiętam, kiedy koledzy z koła pokazali mi możliwość oprogramowania procedur w Revicie i tworzenia parametrycznej geometrii kratownic przestrzennych przy pomocy Dynamo. Z uporem przeszukiwałem internet, aby szybko poznać, jak samodzielnie tworzyć skrypty. Dzięki tej umiejętności mogłem na trzecim roku studiów dołączyć do zespołu BIM jednego z czołowych generalnych wykonawców.

Obecnie, jako świeżo upieczony projektant z uprawnieniami, biorę udział w najbardziej wymagających inwestycjach infrastrukturalnych. Pracowałem przy rozbudowie Metra Warszawskiego, a obecnie projektuję infrastrukturę podziemną dla pierwszej w Polsce Kolei Dużych Prędkości. Poza pracą w biurze realizuję swoją pasję dydaktyczną, prowadząc zajęcia na międzywydziałowych studiach podyplomowych interdyscyplinarny BIM, współtworzonych przez Wydziały Inżynierii Lądowej i Architektury PW.

Dołączenie w 2017 roku do Koła BIMGo wraz z trójką kolegów z roku, pozwoliło mi na odkrycie i dzielenie wspólnej pasji do BIM. Z perspektywy czasu widzę, że właśnie to nadało kierunek całej mojej ścieżce zawodowej.

#### **Kamil Grzebalski, członek zarządu Koła Naukowego BIMGo w latach 2016–2020**

Do koła naukowego BIMGo dołączyłem na samym początku trzeciego semestru studiów, w 2018 roku. Był to moment, w którym poczułem, że od studiów oczekuję czegoś więcej niż realizacji podstawowego programu nauczania. W ramach KN BIMGo mogłem poznać praktyczne wykorzystanie modelowania 3D w budownictwie oraz realną współpracę z biznesem i firmami z branży.

Z początku nie byłem entuzjastą programowanie informatycznego mimo ukończenia liceum o profilu matematyczno-informatycznym. Z czasem jednak zrozumiałem jak ważne i pomocne jest programowanie wizualne w środowisku Dynamo. Wraz z kolegami stworzyliśmy parametryczny model Mostu Świętokrzyskiego, który następnie wykorzystaliśmy podczas Pikniku Naukowego na Stadionie Narodowym, gdzie zaprezentowaliśmy m.in. modele tworzone na podstawie chmur punktów oraz wykorzystanie technologii VR do wirtualnych spacerów. Działalność w kole BIMGo pozwoliła mi rozwinąć zarówno kompetencje twarde, jak i miękkie. W przypadku tych ostatnich kluczowe okazały się doświadczenia związane z organizacją wydarzeń oraz pełnieniem funkcji prezesa koła przez rok. Nauczyły mnie zarządzania pracą dużej grupy

osób, pozyskiwania funduszy, współpracy z firmami zewnętrznymi oraz pracy pod presją terminów.

Z kolei kompetencje twarde rozwijałem przede wszystkim dzięki odkryciu potencjału programowania jako narzędzia do automatyzacji procesów w budownictwie. Zrozumiałem, że programowanie nie jest „sztuką dla sztuki”, ale ma konkretny cel – przyspieszenie i usprawnienie pracy. Z czasem stało się ono na tyle istotne, że wyznaczyło dalszy kierunek mojego rozwoju zawodowego. Obecnie pracuję w firmie Arup. Po trzech latach pracy na stanowisku asystenta inżyniera oraz konsekwentnym rozwijaniu umiejętności programistycznych, wspólnie ze starszą koleżanką z zespołu współtworzyłem zespół Digital, w którym pełnię rolę Digital Consultant. Zespół zajmuje się tworzeniem narzędzi automatyzacyjnych wspierających wszystkie działy firmy – nie tylko inżynierskie, ale również consultingowe.

#### **Jakub Walendzik, członek zarządu Koła Naukowego BIMGo w latach 2020–2022**

Wstępując do Koła Naukowego BIMGo, głównie kojarzyłem metodykę BIM z trójwymiarową reprezentacją projektu. Wiedziałem o narzędziach pozwalających na pewnego rodzaju automatyzację związane z ich opracowaniem oraz byłem świadomy parametryzacji, wtedy rozumianej bardziej jako budowanie rodzin o kilku zmiennych. Zaangażowanie w Kole pozwoliło mi na rozwinięcie tych właśnie obszarów – kompetencji w zakresie „szybszego” oraz parametrycznego modelowania. Z czasem zrozumiałem jednak, że model BIM to coś więcej niż połączenie geometrycznych elementów, zacząłem zauważać warstwę informacyjną. W ślad za tym rozwinąłem umiejętności analityczne, efektywną pracę z parametrami, ich integrację i prezentacji w czytelnej formie.

Szczęśliwie, dla wszystkich członków koła, równie istotne co samorozwój, było dzielenie się wiedzą. Wzajemne organizowanie szkoleń, warsztatów czy prezentacji rozwijało w nas umiejętności komunikacyjne, ale także stwarzało przestrzeń do testowania sposobu przekazywania złożonych zagadnień w przystępnej formie. Niejednokrotnie łatwiej jest omówić problematykę z rówieśnikiem, jednocześnie ucząc się na popełnianych błędach. Nauka przez rozwiązywanie trudnych problemów stanowi ogromną siłę Koła BIMGo.

### **3. Podsumowanie**

Unikalne środowisko, w którym możliwe jest rozwijanie kompetencji odpowiadających realnym wymaganiom rynku stanowiło jednocześnie miejsce budowania fundamentów pod przyszłą karierę w zmieniającym się świecie budownictwa i technologii BIM. Członkowie KN BIMGo przekonali się o tym, pracując zarówno po stronie biura projektowego, jak również będąc zaangażowanym w zadania generalnego wykonawcy. W każdym z przypadków dzięki zebranych wcześniej doświadczeniom Koło Naukowe BIMGo dało im solidne podstawy, wyznaczyło kierunek dalszego rozwoju.

# „WILbołtka” w konkursie Krakow Concrete Canoe Challenge

## „WILbołtka” at the Krakow Concrete Canoe Challenge

Aleksandra Derda, Jakub Zabawski, Zuzanna Miecznikowska, Maciej Bielecki – studenci, dr inż. Maciej Kalinowski (ORCID: 0000-0002-6729-1506), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7433

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono opis projektu kajaka „WILbołtka”, wystawionego przez Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej w konkursie Krakow Concrete Canoe Challenge 2025, ze szczególnym uwzględnieniem składu i właściwości wykorzystanej wysokowartościowej zaprawy fotokatalitycznej oraz technologii wykonania konstrukcji. Ponadto przeprowadzono analizę potencjalnych korzyści środowiskowych, jakie przyniosłoby zastosowanie analogicznego kompozytu w skali infrastrukturalnej – szacunek rocznej zdolności usuwania atmosferycznych zanieczyszczeń gazowych przez opracowaną zaprawę cementową w wyniku reakcji fotokatalitycznych zachodzących na jej powierzchni fotoaktywnej, pod wpływem promieniowania słonecznego. Tym samym „WILbołtka” stała się nie tylko canoe wystawionym w wyścigu kajakarskim, lecz przede wszystkim nośnikiem idei zrównoważonego budownictwa i dowodem na multifunkcjonalność nowoczesnych kompozytów cementowych opracowywanych na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

**Słowa kluczowe:** fotokataliza, tlenki azotu, ozon, kompozyty cementowe, konkurs studencki.

**Abstract:** The paper presents a description of the „WILbołtka” kayak design submitted by the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology to the Krakow Concrete Canoe Challenge 2025 competition, with particular emphasis on the composition and properties of the high-performance photocatalytic mortar used, as well as the construction technology. Furthermore, an analysis of the potential environmental benefits of using a similar composite at an infrastructure scale was conducted, including an estimate of the annual capacity of the developed cement mortar to remove atmospheric gaseous pollutants through photocatalytic reactions on its photoactive surface under solar radiation. Thus „WILbołtka” became not only a canoe entered in a kayaking race, but above all a carrier of the idea of sustainable construction and proof of the multifunctionality of modern cement composites developed at the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology.

**Keywords:** photocatalysis, nitrogen oxides, ozone, cement composites, student competition.

## 1. Wprowadzenie

Konkursy betonowych kajaków od wielu lat stanowią interesujące pole doświadczalne dla inżynierii materiałowej, zmuszając uczestników do przełamania najbardziej intuicyjnego skojarzenia z betonem jako materiałem ciężkim i masywnym. W rzeczywistości współczesne kompozyty cementowe, odpowiednio zaprojektowane pod względem składu, mikrostruktury i technologii wykonania, mogą być formowane w cienkościennie elementy o korzystnym stosunku wytrzymałości do masy, a przy tym zachowywać szczelność, trwałość i odporność na warunki eksploatacyjne. Z tego względu kajak betonowy nie jest wyłącznie efektywnym eksperymentem studenckim, lecz pełnoprawnym demonstratorem możliwości nowoczesnych materiałów kompozytowych stosowanych w budownictwie.

Szczególnie wyraźnie widać to w formule konkursu Krakow Concrete Canoe Challenge – interdyscyplinarnym konkursie studenckim zorganizowanym przez Politechnikę Krakowską, którego pierwsza edycja w 2025 r. zgromadziła drużyny z uczelni technicznych z całej Europy [1]. Idea zawodów wywodzi się z wieloletniej tradycji akademickich zmagania z betonem – na wzór American Society of Civil Engineers (ASCE) Concrete Canoe Competition, gdzie grupy studenckie projektują, budują i ścigają się

kajakami wykonanymi z kompozytów cementowych [2]. Formuła zawodów, w której oceniane są zarówno właściwości techniczne łodzi, jak i innowacyjność użytego materiału oraz estetyka wykonania, stwarza wyjątkową przestrzeń do popularyzacji najnowszych osiągnięć z zakresu technologii betonu w warunkach rzeczywistego, praktycznego zastosowania.

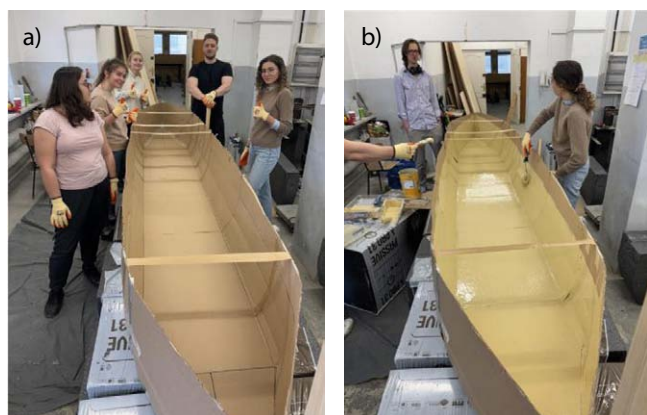
Zespół Koła Naukowego Inżynierii Materiałów Budowlanych Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej postanowił podejść do tego wyzwania w sposób wykraczający poza tradycyjny model konkursowy. Przyjęto założenie, że kajak nie powinien być jedynie poprawnie zaprojektowaną i wykonaną jednostką z kompozytu cementowego, lecz również nośnikiem szerszej idei badawczej i technologicznej. Współczesna inżynieria materiałowa coraz częściej odchodzi bowiem od postrzegania betonu wyłącznie przez pryzmat nośności i trwałości, rozszerzając zakres oczekiwanych właściwości o cechy użytkowe, funkcjonalne i środowiskowe.

## 2. Skład i właściwości zaprawy fotokatalitycznej oraz projekt wykonania „WILbołtki”

Jednym z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju współczesnej technologii betonu są kompozyty fotokatalityczne, zdolne do inicjowania reakcji prowadzących do rozkładu wybranych

zanieczyszczeń gazowych pod wpływem promieniowania o odpowiedniej długości fali [3]. W przypadku fotokatalitycznych kompozytów cementowych, mechanizm ten opiera się na aktywacji ziaren nanomodifikatorów fotokatalitycznych (np. nano-TiO<sub>2</sub>) obecnych w strefie przypowierzchniowej materiału [4]. Pod wpływem światła na ich powierzchni powstają reaktywne formy utleniające, przede wszystkim rodniki hydroksylowe (•OH) oraz aniony ponadtlenkowe (O<sub>2</sub><sup>-•</sup>), które uczestniczą w przemianach szkodliwych zanieczyszczeń obecnych w powietrzu [5]. Szczególne znaczenie ma tu zdolność do rozkładu tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) oraz ozonu przypowierzchniowego (O<sub>3</sub>), należących do najistotniejszych zanieczyszczeń atmosfery miejskiej [6]. W wyniku utleniania NO<sub>x</sub> powstają głównie azotany (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), które mogą być następnie usuwane z powierzchni kompozytu przez wodę opadową, co pozwala ograniczać stężenie zanieczyszczeń bez generowania produktów ubocznych stanowiących istotne zagrożenie środowiskowe [7, 8]. W przypadku zastosowania nanomodifikatorów fotokatalitycznych w kompozytach cementowych otwiera to możliwość nadania elementom konstrukcyjnym (lub pływającym) dodatkowej funkcji środowiskowej, bez rezygnacji z ich podstawowej roli nośnej [9]. Oprócz aspektu materiałowego istotną kwestią pozostał sam projekt konstrukcji kajaka. Podstawą jego opracowania była koncepcja cienkościenniej konstrukcji kompozytowej, charakteryzująca się długością całkowitą ok. 4,25 m, szerokością podstawy ok. 0,55 m, szerokością całkowitą ok. 0,85 m, wysokością ok. 0,33 m oraz grubością ścianek w zakresie 5–10 mm, w której wysokowartościowa zaprawa cementowa pełniła funkcję spoiwa nakładanego na osnowę wykonaną ze zbrojenia tekstylnego – fizeliny z włókna szklanego. Formę canoe przygotowano z tektury (rys. 1a) pokrytej jednoskładnikową żywicą poliuretanową (rys. 1b). Następnie przed rozpoczęciem nakładania warstw zaprawy na osnowie tekstylnej, żywicę pokryto środkiem antyadhezyjnym.

Przyjęte rozwiązanie materiałowe podporządkowano kilku równoległym wymaganiom. Po pierwsze, opracowany kompozyt musiał umożliwić wykonanie małej grubości ścianek, tak aby finalna konstrukcja zachowała korzystny stosunek masy do sztywności. Po drugie, konieczne było zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej i szczelności zaprawy



**Rys. 1.** Tekturowa forma canoe (a), forma pokryta warstwą żywicy (b) (zdjęcia własne)

fotokatalitycznej. Po trzecie, istotne było utrzymanie odpowiedniej jakości powierzchni zewnętrznej, która w tego rodzaju rozwiązaniu nie pełni wyłącznie funkcji estetycznej, lecz pozostaje ściśle związana z zakładaną aktywnością fotokatalityczną [10]. Z tego względu do wykonania canoe zastosowano wysokowartościową fotokatalityczną zaprawę cementową o składzie przedstawionym w tabeli 1 i właściwościach mechanicznych i wpływających na trwałość przedstawionych w tabeli 2. Właściwości mechaniczne zaprawy określono w oparciu o PN-EN 196-1 [14], nasiąkliwość w oparciu o PN-EN 13369 [15], penetrację wody pod ciśnieniem w oparciu o PN-EN 12390-8 [16], karbonatyzację w oparciu o PN-EN 12390-12 [17] oraz podciąganie kapilarne w oparciu o PN-EN 1015-18 [18]. Badania były przeprowadzane na próbkach zapraw rozformowanych po 24

**Tabela 1.** Skład wykorzystanej fotokatalitycznej zaprawy cementowej oraz jej ślad węglowy (na podstawie [11–13])

| L.P. | Składnik        | Rodzaj                    | Ilość, kg/m <sup>3</sup>                            | GWP (A1-A3), kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> |
|------|-----------------|---------------------------|---|---|
| 1    | Cement          | CEM II/A-S 52,5R          | 811   | 570,9   |
| 2    | Mikrowypełniacz | Mączka wapienna           | 111   | 12,2  |
| 3    |                 | Pył krzemionkowy          | 10  | 0,1   |
| 4    |                 | nano-dwutlenek tytanu(IV) | 15  | 52,5  |
| 5    | Woda            | Wodociągowa               | 292   | -   |
| 6    | Kruszywo drobne | Piasek kwarcowy 0.1/0.5   | 526   | 26,3  |
| 7    |                 | Piasek kwarcowy 0.5/1.2   | 526   | 26,3  |
| 8    | Domieszki       | Superplastyfikator PCE    | 8,0   | 16,0  |
|      |                 |                           | <b>SUMA</b><br>kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> | 704,3   |

**Tabela 2.** Właściwości fotokatalitycznej zaprawy cementowej

| Właściwość   | Liczba próbek | Jednostka                                 | Wartość średnia | Współczynnik zmienności, % |
|--|---------------|---|-----------------|----------------------------|
| Nasiąkliwość   | 6             | %   | 6,9             | 2,9                        |
| Wytrzymałość na ścislenie 2 dni,                       | 6             | MPa                                       | 42,1            | 5,6                        |
| Wytrzymałość na ścislenie 28 dni                       | 6             | MPa                                       | 82,2            | 3,7                        |
| Podciąganie kapilarne C10-90                           | 12            | kg/(m <sup>2</sup> · min <sup>0,5</sup> ) | 0,043           | 8,3                        |
| Podciąganie kapilarne C0-24                            | 12            | kg/m <sup>2</sup>                         | 1,080           | 9,1                        |
| Penetracja wody pod ciśnieniem                         | 3             | mm  | 5,6             | 4,1                        |
| Karbonatyzacja (90 dni w stężeniu 3% CO <sub>2</sub> ) | 3             | mm  | 0,0             | 0,0                        |

godzinach od przygotowania i przechowywanych w komorze klimatycznej w temperaturze  $20 \pm 2$  °C w wilgotności względnej RH = 95% do momentu badania.

Właściwości w zakresie fotokatalitycznej zdolności do usuwania zanieczyszczeń gazowych określono dla tlenków azotu oraz przypowierzchniowego ozonu wg PW/TMS/OP/1 – procedury wewnętrznej Politechniki Warszawskiej opierającej się na normie ISO 22197-1:2016 [19]. Istotną różnicą w wykorzystanej metodzie badania a przywołaną normą na wzór której została opracowana jest oświetlenie powierzchni fotoaktywnych promieniowaniem UV-A o dziesięciokrotnie zmniejszonej irradiancji (z 10 do 1 W/m<sup>2</sup>), przy jakiej określana jest efektywność fotokatalityczna kompozytu oraz niskoenergetycznym światłem widzialnym (VIS) – pozbawionym pasma UV – o irradiancji 150 W/m<sup>2</sup>. Zmiana została wprowadzona w celu określenia zdolności fotokatalitycznej w niesprzyjających warunkach naświetleniowych (warunki jesienno-zimowe na terenie Polski). Jednocześnie, dziesięciokrotnie zmniejszono stężenie początkowe tlenków azotu (z 1000 do 100 ppb) w celu określenia zdolności fotokatalitycznej przy stężeniach analizowanych zanieczyszczeń zbliżonych do obserwowanych na stacjach komunikacyjnych jakości powietrza w aglomeracjach miejskich zlokalizowanych na terenie Polski. Wszystkie przyjęte zmiany w odniesieniu do ww. normy urealnijają warunki badania, symulując efektywność powierzchni fotokatalitycznych w oczyszczaniu powietrza w warunkach rzeczywistych i przyczyniają się do ograniczenia obserwowalnej efektywności kompozytu w fotokatalitycznym usuwaniu zanieczyszczeń gazowych w porównaniu z wynikami uzyskiwanymi w warunkach według przywołanej normy ISO [19].

Próbki do badania o wymiarach 140x160x40 mm pielęgnowano po wykonaniu przez 28 dni w komorze klimatycznej. Przed przystąpieniem do testu, z analizowanej powierzchni (spodniej od formy) pozbyto się zanieczyszczeń – przemyto ją za pomocą wody destylowanej i oczyszczono mechanicznie. Następnie, próbki przez dwie godziny były suszone w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 60°C, a następnie zostały umieszczone w komorze naświetleniowej na 16 godzin, w której pod wpływem światła UV-A o irradiancji 10 W/m<sup>2</sup> zostały wypalone z ich powierzchni zanieczyszczenia organiczne (np. pozostałości środka antyadhezyjnego). W ostatnim etapie przygotowania próbki ponownie przemyto wodą destylowaną i suszono w suszarce w temperaturze 60°C przez 4 godziny. Następnie, próbki były umieszczane w komorze reakcyjnej, w której utrzymywano temperaturę  $20 \pm 2$  °C oraz wilgotność względną  $40 \pm 5\%$ . W trakcie całego badania przepływ gazu w komorze wynosił 2 l/min. Stężenie tlenków azotu przy wejściu do komory wynosiło  $100 \pm 5$  ppb.

Źródła światła podczas testu były naprzemiennie włączane i wyłączane. Cykl badania rozpoczynano od 30-minutowego etapu wypełniania komory NO. Następnie, przez 60 minut próbki były naświetlane światłem łączonym (UV-A + widzialne), a zmiany w stężeniu NO<sub>x</sub> były rejestrowane z wykorzystaniem analizatora Teledyne API T200. Po zakończeniu tego etapu, światło wyłączano, utrzymując przez 30 minut przepływ gazu. Na podstawie

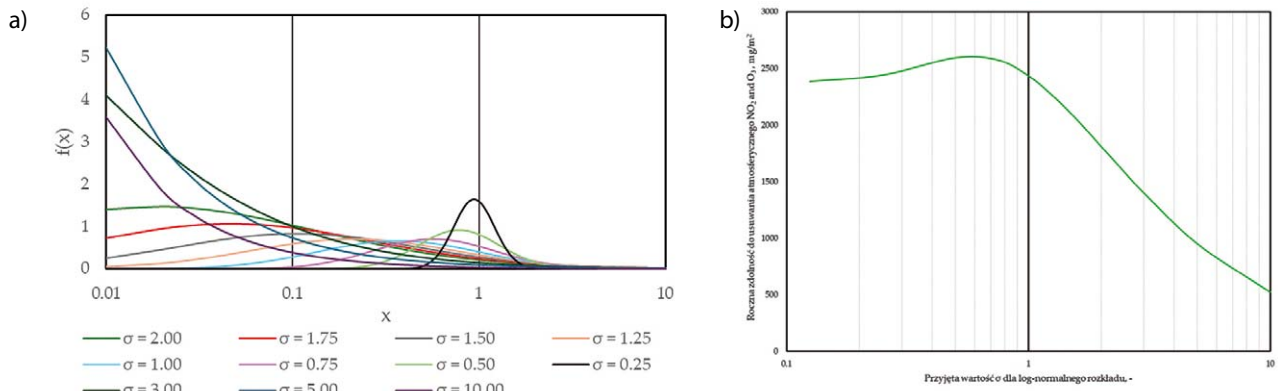
uzyskanych wyników obliczono ilość NO wprowadzonego do reaktora oraz ilość NO i NO<sub>x</sub> usuniętego przez próbkę w procesach fotokatalitycznych. Dzięki zgromadzonym podczas testu danym określono zdolność kompozytu do usuwania gazowego NO<sub>2</sub> w analizowanych warunkach oświetleniowych.

Ze względu na wysoką reaktywność ozonu, procedura testowa jego fotokatalitycznego usuwania została zmodyfikowana w porównaniu z metodą dla NO<sub>x</sub>. Test trwał 6 godzin i został przeprowadzony przy takich samych warunkach naświetleniowych i stężenia zanieczyszczeń (100 ppb) jak w procedurze dla NO<sub>x</sub>. Przez pierwsze 4 godziny, przy wyłączonych źródłach światła, reaktor nasycano ozonem. Gdy jego stężenie się ustabilizowało, włączono zarówno źródło światła UV-a, jak i widzialnego, a następnie rejestrowano zmianę stężenia O<sub>3</sub>. Na podstawie uzyskanych zmian stężeń obliczono szybkość usuwania O<sub>3</sub>, wyrażoną jako bezwzględna redukcja O<sub>3</sub> w mikrogramach na godzinę na metr kwadratowy – tabela 3.

Czynniki, takie jak sezonowe wahania natężenia promieniowania słonecznego, wilgotności powietrza, temperatury i stężeń zanieczyszczeń powietrza przyczyniają się do zmian w wydajności fotokatalitycznej w warunkach rzeczywistych w odniesieniu do badań przeprowadzanych w warunkach laboratoryjnych [20, 21]. Aby uwzględnić tę zmienność przy ocenie zdolności fotokatalitycznych kompozytu, wykorzystano rozkłady logarymiczno-normalne, aby modelować gęstość prawdopodobieństwa czynników środowiskowych wpływających na efektywność fotokatalityczną kompozytu (rys. 2) [8]. Ich wpływ został zintegrowany z symulacją numeryczną za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa o zmiennym współczynniku  $\sigma$  w zakresie 0,25–10 (równanie 1). Metoda umożliwiła określenie liczby godzin w roku, w których szybkość usuwania przekraczała, była zgodna z lub spadała poniżej wartości odniesienia uzyskanych w warunkach laboratoryjnych. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń określono, że w zależności od warunków środowiskowych opracowana zaprawa jest w stanie pasywnie usuwać do 2600 mg/m<sup>2</sup> analizowanych zanieczyszczeń

**Tabela 3.** Zdolności do fotokatalitycznego usuwania wybranych zanieczyszczeń gazowych przez zaprojektowaną zaprawę fotokatalityczną

| Właściwość  | Liczba próbek | Jednostka          | Wartość średnia | Współczynnik zmienności, % |
|---|---------------|--------------------|-----------------|----------------------------|
| Zdolność do fotokatalitycznego usuwania atmosferycznego O <sub>3</sub>  | 3             | µg/hm <sup>2</sup> | 127,2           | 5,4                        |
| Zdolność do fotokatalitycznego usuwania atmosferycznego NO <sub>2</sub> | 3             |                    | 353,8           | 6,8                        |

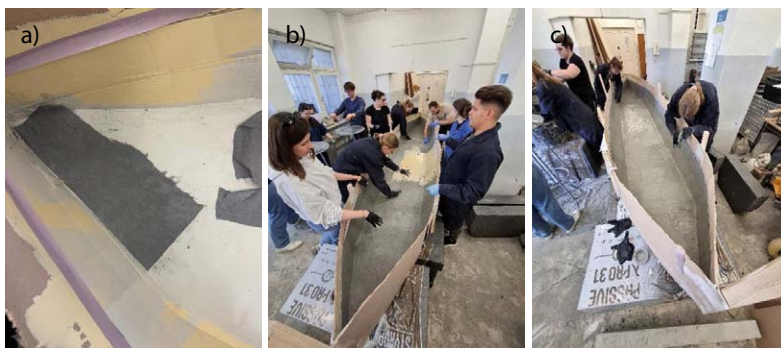


**Rys. 2.** Gęstość prawdopodobieństwa w zależności od przyjętego współczynnika  $\sigma$  (a), zamodelowana roczna zdolność do usuwania  $\text{NO}_2$  i  $\text{O}_3$  w zależności od przyjętego współczynnika  $\sigma$  (wpływu warunków środowiskowych na proces fotokatalizy) (b)

gazowych rocznie (ok. 8000 m<sup>3</sup> oczyszczonego powietrza), znacząco ograniczając swój początkowy ślad węglowy (ozon powierzchniowy jest silnym gazem cieplarnianym, a  $\text{NO}_2$  prekursorem jego powstawania [6]).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (1)$$

Canoe zostało wykonane w technologii wielowarstwowej z fizełiny z włókna szklanego namoczonej w zaprojektowanej zaprawie fotokatalizacyjnej (rys. 3a). Na przygotowaną formę stopniowo nakładano ręcznie nasączone arkusze tekstylne (rys. 3b), aż do uzyskania projektowanej grubości ścianek kajaka (ok. 3–4 mm) (rys. 3c).



**Rys. 3.** Nakładanie nasączonych zaprawą arkuszy (a), dopełnianie kształtu konstrukcji (b), wykończenie powierzchni ścianek (c) (zdjęcia własne)



**Rys. 4.** Konstrukcja po rozformowaniu (a), konstrukcja po wykonaniu wzmocnienia w postaci siatki podtynkowej (b), canoe na etapie dalszej pielęgnacji (c) (zdjęcia własne)

Canoe rozformowano po 48 godzinach (rys. 4a). Następnie pielęgnowano je wilgotnościowo przez 7 dni. Po tym czasie zostało ono obrócone, a na powierzchni zewnętrznej została naniesiona dodatkowa warstwa zaprawy fotokatalizacyjnej wzmocniona siatką podtynkową z włókna szklanego (rys. 4b). Dodatkowa warstwa została naniesiona w celu wyrównania i uszczelnienia powierzchni zewnętrznej oraz zwiększenia średniej grubości ścianek. Canoe pozostawiono w pozycji obróconej i poddano pielęgnacji przez kolejne 7 dni (rys. 4c). Proces zwieńczono wykonaniem zdobień na ściankach i umieszczeniem na jednej z nich nazwy zespołu, zachowując reprezentatywne barwy wydziałowe (rys. 5). Każdy element był ręcznie malowany, co nadało konstrukcji

szczególny i unikalny charakter.

Ramy konkursowe zakładały nie tylko wykonanie kajaka oraz przeprowadzenie badań właściwości materiałowych opracowanego kompozytu, ale również praktyczną weryfikację zaprojektowanej konstrukcji w warunkach rzeczywistego użytkowania, podczas wyścigów wioślarskich (rys. 6). Ten etap miał szczególne znaczenie, ponieważ pozwalał ocenić nie tylko poprawność przyjętych założeń materiałowych i technologicznych, lecz także ich skuteczność w warunkach rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych.

### 3. Podsumowanie

Zespół WILbołtki uczestniczył w wydarzeniu po raz pierwszy, rywalizując z doświadczonymi drużynami z różnych ośrodków europejskich. Dodatkowego znaczenia całemu przedsięwzięciu nadawał fakt, że projekt został zrealizowany z okazji jubileuszu 200-lecia Politechniki Warszawskiej, stając się zarazem symbolicznym połączeniem tradycji uczelni z nowoczesnym podejściem do inżynierii materiałowej i projektowania konstrukcji. Choć start nie zakończył się miejscem na podium, udział w konkursie należy uznać za sukces, przede wszystkim ze względu na wartość poznawczą



Rys. 5. Kompozycja malowanych ręcznie zdobień (zdjęcia własne)

i rozwojową całego przedsięwzięcia. Zespół uzyskał możliwość skonfrontowania własnych rozwiązań z projektami rozwijanymi przez bardziej doświadczone drużyny, a także zweryfikowania swoich kompetencji w obszarze badań materiałowych, projektowania konstrukcji cienkościennych, technologii wykonania oraz organizacji pracy zespołowej.

Szczególnie istotne było to, że konkurs ujawnił praktyczny wymiar wielu decyzji podejmowanych wcześniej na etapie laboratoryjnym i projektowym. W warunkach rywalizacji uwidaczniają się bowiem nie tylko właściwości samego materiału, ale również jakość wykonania, odporność konstrukcji na transport i montaż, ergonomia jednostki, a także stopień dopracowania detali wpływających na zachowanie kajaka podczas pływania. Tym samym udział w zawodach dostarczył informacji, których nie da się w pełni uzyskać wyłącznie w warunkach laboratoryjnych. Dla zespołu był to więc nie tylko sprawdzian gotowego obiektu, ale również cenna lekcja dotycząca relacji między założeniami badawczymi a praktyką inżynierską.

Zebrane doświadczenia stanowią solidną podstawę dla przyszłych projektów i kolejnych edycji konkursu. Dotyczy to zarówno możliwych modyfikacji materiałowych, związanych z dalszą optymalizacją kompozytu, jak i udoskonalień projektowych oraz organizacyjnych, obejmujących geometrię kadłuba, sposób wykonania poszczególnych warstw, logistykę przygotowań i strategię samego startu. W tym sensie debiut WILbołtki należy postrzeżać nie jako zamknięty epizod, lecz jako pierwszy etap dłuższego procesu rozwojowego. Projekt potwierdził, że połączenie badań nad nowoczesnymi kompozytami cementowymi z praktycznym wyzwaniem konstrukcyjnym może prowadzić do wartościowych rezultatów zarówno naukowych, jak i dydaktycznych, a sam konkurs okazał się skutecznym polem weryfikacji i dalszej inspiracji.



Rys. 6. Udane pierwsze wodowanie na torze wyścigowym przed startem w zawodach (a), zespół Koła Inżynierii Materiałów Budowlanych wraz z dziekanem Wydziału Inżynierii Łądowej prof. dr. hab. inż. Andrzejem Garbaczem (b) (zdjęcia własne)

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Kraków Concrete Canoe Challenge: [https://canoe.pk.edu.pl/\(10.04.2026.r.\)](https://canoe.pk.edu.pl/(10.04.2026.r.))
- [2] [https://www.asce.org/communities/student-members/conferences/rules/\(10.04.2026.r.\)](https://www.asce.org/communities/student-members/conferences/rules/(10.04.2026.r.))
- [3] Sapiña M., Jimenez-Relinque E., Castellote M., Controlling the levels of airborne pollen: Can heterogeneous photocatalysis help? *Environmental Science and Technology* 47, 2013, str. 11711–11716
- [4] Ballari M. M., Yu Q. L., Brouwers H. J. H., Experimental study of the NO and NO<sub>2</sub> degradation by photocatalytically active concrete, *Catalysis Today* 161, 2011, str. 175–180
- [5] Tsang C.H. A., Li K., Zeng Y., Zhao W., Zhang T., Zhan Y., Huang H., Titanium oxide-based photocatalytic materials development and their role in the air pollutants degradation: Overview and forecast, *Environ International* 125, 2019, str. 200–228
- [6] Derwent R. G., Utembe S. R., Jenkin M. E., Khan M. A. H., Shallcross D. E., Investigating the role of organic compounds in intercontinental ozone transport: Reactivity scales and Global Warming Potentials (GWPs), *Atmospheric Environment* 306, 2023, art. 119817
- [7] Yang Y., Ji T., Su W., Yang B., Zhang Y., Yang Z., Photocatalytic NO<sub>x</sub> abatement and self-cleaning performance of cementitious composites with g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheets under visible light, *Construction Building Materials* 225, 2019, str. 120–131
- [8] Kalinowski M., Chilton K., Jackiewicz-Rek W., Photocatalytic Performance of Cementitious Composites Modified with Second-Generation Nano-TiO<sub>2</sub> Dispersions: Influence of Composition and Granulation on NO<sub>x</sub> Purification Efficiency, *Coatings* 15, 2025, str. 148
- [9] Chen M., Chu J. W., NO<sub>x</sub> photocatalytic degradation on active concrete road surface – From experiment to real-scale application, *Journal of Cleaner Production* 19, 2011, str. 1266–1272
- [10] Chilton K., Kalinowski M., Jackiewicz-Rek W., Influence of Coarse Aggregate Exposure on Air Purification Efficiency in Photocatalytic Cement Composites, *Buildings* 14, 2024, art. 3639
- [11] Sokołowska J. J., Chmielewska B., Carbon Footprint and CO<sub>2</sub> Emissions in the Concrete-Polymer Composites Technology. In *Concrete-Polymer Composites in Circular Economy*, Proceedings of the ICPC, Warsaw, 17–20 September 2023; Czarniecki L., Garbacz A., Wang R., Frigione M., Aguiar J. B., Eds., Springer: Cham, Switzerland, Springer Proceedings in Materials 61, 2024, str. 61
- [12] Pesqueira J. F., Pereira M. F. R., Silva A. M., A life cycle assessment of solar-based treatments (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> photocatalysis, circumneutral photo-Fenton) for the removal of organic micropollutants, *Science of Total Environment* 761, 2021, art. 143258
- [13] Turner L. K., Collins F. G., Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete, *Construction Building Materials* 43, 2013, str. 125–130
- [14] PN-EN 196-1:2016-07: Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2016
- [15] PN-EN 13369:2024-05: Wspólne zasady dotyczące prefabrykatów z betonu
- [16] PN-EN 12390-8:2019-08: Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
- [17] PN-EN 12390-12:2020-06: Badania betonu – Część 12: Oznaczanie odporności betonu na karbonatyzację – Metoda przyspieszonej karbonatyzacji
- [18] PN-EN 1015-18:2003: Metody badań zapraw do murów – Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy
- [19] ISO 22197-1:2016: Fine Ceramics (Advanced Ceramics, Advanced Technical Ceramics) – Test Method for Air-Purification Performance of Semiconducting Photocatalytic Materials. International Standard Committee: Geneva, Switzerland, 2016
- [20] de Melo J. V. S., Trichês G., Evaluation of the influence of environmental conditions on the efficiency of photocatalytic coatings in the degradation of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), *Building Environment* 49, 2012, str. 117–123
- [21] Yu Q. L., Brouwers H. J. H., Indoor air purification using heterogeneous photocatalytic oxidation. Part I: Experimental study, *Applied Catalysis B Environmental* 92, 2009, str. 454–461

# Wpływ nanomodifikatora $\text{TiO}_2$ na skurcz wczesny betonu

## The influence of $\text{TiO}_2$ nanomodifier on early shrinkage of concrete

inż. Aleksandra Derda, dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek (ORCID: 0000-0001-6056-5458),  
Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7435

**Streszczenie:** Właściwości fotokatalityczne kompozytów cementowych, uzyskuje się m.in. poprzez modyfikację składu dwutlenkiem tytanu ( $\text{TiO}_2$ ). Aby ocenić wpływ tego nanomodifikatora na właściwości betonu fotokatalitycznego, przeprowadzono badania konsystencji mieszanki betonowej, wytrzymałości na ściskanie oraz skurczu wczesnego. Oznaczenie odkształceń skurczowych wykonano przy użyciu rynny skurczowej, w trakcie pierwszych 72 h po zaformowaniu. Biorąc pod uwagę, że przeważnie badania skurczu rozpoczyna się dopiero 24 h po zaformowaniu, analiza zjawisk występujących w początkowych fazach dojrzewania mieszanki stanowić będzie podstawy do kolejnych badań w tym zakresie.

**Słowa kluczowe:** beton fotokatalityczny, ściskanie, skurcz wczesny betonu.

**Abstract:** Photocatalytic properties of cement composites are achieved, among other things, by modifying the composition with titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ). To assess the effect of this nanomodifier on the properties of photocatalytic concrete, tests were conducted on the concrete mix's consistency, compressive strength, and early shrinkage. Shrinkage strains were determined using a shrinkage drain during the first 72 hours after molding. Given that shrinkage testing, typically begins 24 hours after molding, analysis of phenomena occurring in the initial stages of mix maturation will provide the basis for further research in this area.

**Keywords:** photocatalytic concrete, compression, early shrinkage of concrete.

## 1. Wprowadzenie

Analiza właściwości materiałów modyfikowanych fotokatalizatorami była do tej pory tematem licznych publikacji naukowych, nie tylko w kontekście oczyszczania powietrza, ale również zanieczyszczeń środowiskowych [1–7]. Dwutlenek tytanu ( $\text{TiO}_2$ ) jest jednym z najczęściej stosowanych związków, który w wyniku absorpcji promieniowania słonecznego inicjuje reakcję chemiczną lub wpływa na szybkość jej zachodzenia. Skurcz wczesny natomiast jest istotnym zjawiskiem, powiązaniem z badaniem wczesnych właściwości reologicznych betonu. Głównymi składowymi wpływającymi na jego przebieg są: skurcz chemiczny, autogeniczny, plastyczny oraz skurcz od wysychania. W przypadku betonów fotokatalitycznych temat skurczu wczesnego nie został jeszcze szeroko rozpoznany, a obserwacje zjawiska skurczu rozpoczyna się najczęściej po upływie 24 h od wytworzenia mieszanki betonowej. Wynikiem tego, jest brak jednoznacznych informacji, jakie zmiany zachodzą w materiale w początkowej fazie dojrzewania. W związku z tym podjęcie badań i analiza skurczu wczesnego pozwoli na opracowanie podstaw do dalszego rozwoju w zakresie materiałów o właściwościach fotokatalitycznych.

## 2. Betony fotokatalityczne

Fotokataliza to proces wywołany działaniem promieniowania UV, światła widzialnego lub podczerwieni, który powoduje zmiany w przebiegu reakcji chemicznych tj. szybkość ich zachodzenia [8]. Kluczowa jest jednak obecność fotokatalizatora, czyli substancji absorbującej światło oraz biorącej udział w reakcji utleniania, prowadzącej do usuwania zanieczyszczeń w wyniku rozkładu [9].

Fotokataliza pozwala na utlenianie szkodliwych związków  $\text{NO}_x$  z powietrza, tak samo jak zabrudzeń organicznych, np. kurzu, pyłów. Dwutlenek tytanu jest substancją, której przypisuje się silne właściwości fotokatalityczne. Z tego względu jest on powszechnie stosowany w roli fotokatalizatora.  $\text{TiO}_2$  występuje w trzech fazach krystalicznych: anataz, brukit i rutil, jednak wysoką aktywność fotokatalityczną przypisuje się głównie formie anatazowej [10]. Dwutlenek tytanu w przemyśle budowlanym stosowany jest w postaci: nanometrycznego  $\text{TiO}_2$  w postaci proszku, cementu zawierającego w swoim składzie nanometryczny dwutlenek tytanu  $\text{TiO}_2$  np. TioCem lub dyspersji fotokatalitycznej.

Betony są materiałami budowlanymi, które są szeroko analizowane pod kątem nadawania im właściwości fotokatalitycznych, czyli samooczyszczania powierzchni, oczyszczania powietrza oraz właściwości hydrofilowych. Ze względu na sposób otrzymywania betonów fotokatalitycznych można wyróżnić 3 grupy: betony zwykłe pokryte cienką warstwą fotokatalizatora (zawiesiny), betony dwuwarstwowe oraz betony zmodyfikowane w całej objętości materiału, zgodnie ze schematem na rysunku 1. Z uwagi na to, że fotokataliza zachodzi wyłącznie na powierzchni, betony fotokatalityczne przeważnie wykonywane są dwuwarstwowo (grupa 2).

## 3. Skurcz wczesny betonu

Skurcz jest zjawiskiem szczególnie niepożądanym, ale i nieuniknionym, zarówno w konstrukcjach betonowych, jak i żelbetonowych. Uwzględniany jest nie tylko na etapie projektowania, ale też wykonawstwa.

Przebieg zjawiska skurczowego jest złożony i długotrwały. Rozpoczyna się od kontaktu cementu z wodą, które w wyniku reakcji



**Rys. 1.** Schematyczny podział betonów fotokatalitycznych ze względu na sposób wykonania

hydratacji, prowadzą do zmniejszenia się całkowitej objętości materiału [11]. Definiuje się to jako skurcz chemiczny. Następnym skurczem chemicznym w okresie twardnienia jest skurcz autogeniczny (autowysychanie). Wynika on z powstania w zaczynie porów powietrznych, które w związanym zaczynie mogą doprowadzić do powstania mikrospeków w strukturze betonu [12]. Kiedy beton znajduje się w stanie plastycznym, można zaobserwować zmiany objętościowe, w niezwiązanym jeszcze materiale. Skurcz plastyczny wywołany jest zmniejszeniem się ilości wody w betonie, w wyniku jej parowania, co związane jest z porowatym charakterem mikrostruktury materiału. Pielęgnacja i odpowiednie zabezpieczenie betonu przed odparowywaniem wody, pozwalają uniknąć pojawienia się speków i rys skurczowych [13]. Skurcz występuje również po stwardnieniu betonu, szczególnie jeżeli znajduje się w środowisku o niskiej wilgotności względnej [12]. Utrata wody zgromadzonej w porach kapilarnych, w wyniku jej odparowania, skutkuje pojawieniem się skurczu od wysychania. Wyróżnia się również skurcz termiczny, czyli odkształcenie betonu powstałe w wyniku oddziaływania temperatury (powiązane z egzotermiczną reakcją hydratacji, a później z niestabilnością temperaturową otoczenia), oraz skurcz karbonatyzacyjny wywołany długotrwałym oddziaływaniem dwutlenku węgla na powierzchnię betonu [13, 14].

#### 4. Przedmiot badań

Zaprojektowano 4 składy według przyjętych założeń:

- klasa konsystencji mieszanki: S4 (160÷210 mm),
- stała wartość współczynnika  $w/c = 0,38$ ,
- zawartość powietrza na poziomie: 5,0÷6,5%,
- kruszywo o wymiarze ziaren  $D_{max} = 8$  mm,
- modyfikacja mieszanki różną zawartością nanometrycznego P25, pełniącego rolę fotokatalizatora: od 0 do 30 kg/m<sup>3</sup>.

#### 5. Opis badania skurczu wczesnego i stanowiska badawczego

Badania skurczu wczesnego, przeprowadzono za pomocą rynny skurczowej, w oparciu o austriacką normę ÖENORM B 3329 [15]. Zastosowano aparaturę o przekroju w kształcie litery U i wymiarach wewnętrznych 500x100x60 mm, zabezpieczoną od wewnątrz arkuszami pianki neoprenowej o grubości 3 mm. Urządzenie wyposażone jest w czujnik przemieszczeń liniowych LVDT oraz dwa mocowania, z czego jedno z nich składa się również z ruchomej płytki i trzpienia.

Badanie rozpoczęto od zaformowania próbek z mieszanki betonowej w dwóch warstwach i zagęszczeniu. Wykonano po 2 próbki z każdego składu. Następnie formy przeniesiono

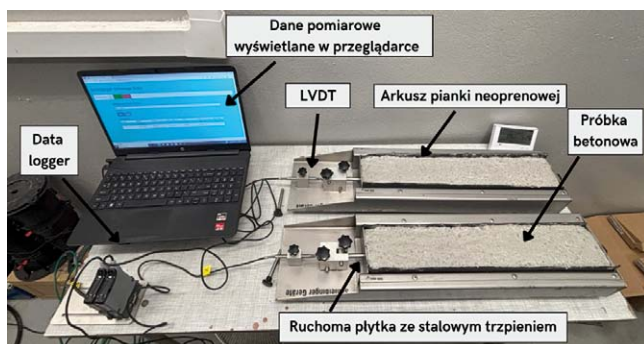
**Tabela 1.** Składy zaprojektowanych mieszank betonowych

| Składniki                      | Skład na 1 m <sup>3</sup> [kg] |                      |                      |                      |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                | Oznaczenie składu              |                      |                      |                      |
|                                | REF                            | TiO <sub>2</sub> -10 | TiO <sub>2</sub> -20 | TiO <sub>2</sub> -30 |
| Cement CEM II/A-M (S-LL) 52,5N | 420                            | 420                  | 420                  | 420                  |
| Woda wodociągowa               | 160                            | 160                  | 160                  | 160                  |
| CHRYSO Premia 565              | 4,200                          | 4,788                | 7,896                | 9,198                |
| Centrament Air 220             | 0,420                          | 0,210                | 0                    | 0                    |
| Piasek rzeczny 0/2             | 940                            | 934                  | 931                  | 928                  |
| Grys bazaltowy 2/8             | 942                            | 942                  | 938                  | 935                  |
| P25                            | 0                              | 10                   | 20                   | 30                   |

na stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 2, gdzie utrzymywano temperaturę na poziomie  $T = 19 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotność względną powietrza:  $RH = 52 \pm 2\%$ . Pomiar trwał 72 h, a jego początek wyznaczono jako moment ustabilizowania się mieszanki betonowej. Dane zarejestrowano za pomocą rejestratora danych (data-logger).

#### 6. Wyniki i ich analiza

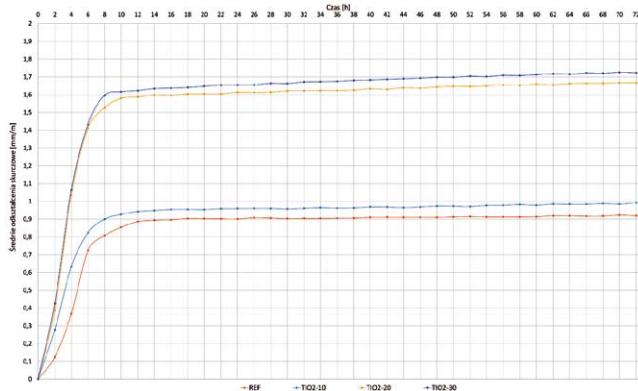
Wykonano oznaczenia konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka, zgodnie z normą [16]. Każdy z wyników potwierdził uzyskanie założonej konsystencji S4 (160÷210 mm). Przeprowadzono badania skurczu wczesnego za pomocą rynny skurczowej oraz badania wytrzymałości na ściskanie betonu po 3 i 28 dniach według PN-EN 12390-3 [17]. Wyniki średniego skurczu wczesnego zestawiono w tabeli 2 oraz na rysunku 3, natomiast wyniki wytrzymałościowe przedstawiono na rysunku 4. Na podstawie wyników zmian liniowych próbek betonowych można stwierdzić, że występuje zależność pomiędzy zawartością TiO<sub>2</sub> a wielkością skurczu wczesnego. W początkowej fazie dojrzewania, wraz ze wzrostem zawartości dwutlenku tytanu, mieszanka betonowa wykazuje większe odkształcenia skurczowe. Zmodyfikowanie składu mieszanki TiO<sub>2</sub> w ilości 10 kg/m<sup>3</sup>, wywołało wzrost średniego całkowitego skurczu o prawie 8%. Znaczne nasilenie zjawiska zaobserwowano natomiast przy zwiększeniu zawartości nanomodifikatora z 10 do 20 kg/m<sup>3</sup>, gdzie odkształcenie skurczowe wzrosło o ok. 68%. Skład TiO<sub>2</sub>-30 osiągnął najwyższy skurcz na poziomie -1,72 mm/m. Zestawienie przedstawione na rysunku 3 potwierdza, że największy przyrost odkształceń skurczowych, każdego ze składów,



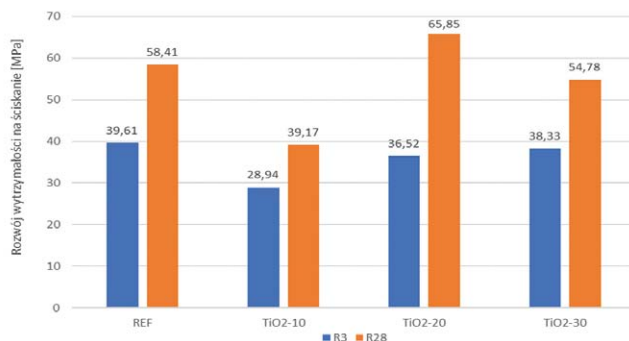
**Rys. 2.** Stanowisko pomiarowe do badania skurczu wczesnego, fotografia własna

**Tabela 2.** Wyniki skurczu wczesnego próbek betonowych

| Skład                | Odczyt nr 1 [mm/m] | Odczyt nr 2 [mm/m] | Średnia wartość [mm/m] |
|----------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| REF                  | -0,931             | -0,912             | -0,922                 |
| TiO <sub>2</sub> -10 | -1,052             | -0,934             | -0,993                 |
| TiO <sub>2</sub> -20 | -1,713             | -1,626             | -1,669                 |
| TiO <sub>2</sub> -30 | -1,755             | -1,690             | -1,723                 |



**Rys. 3.** Średni skurcz każdego z badanych betonów



**Rys. 4.** Średnie wytrzymałości na ściskanie betonu po 3 i 28 dniach

występuje w trakcie pierwszych 8 h od rozpoczęcia pomiaru. Następnie materiał się stabilizuje i zmiany liniowe postępują wolniej. Wyniki badań wytrzymałościowych wykazały, że zawartość TiO<sub>2</sub> w składzie mieszanki betonowej ma również wpływ na wytrzymałość na ściskanie betonu. W przypadku modyfikowanych składów, wraz ze wzrostem zawartości dwutlenku tytanu, wzrasta wytrzymałość wczesna betonu (po 3 dniach). Najwyższe wyniki wytrzymałości wczesnej osiągnęły próbki ze składu referencyjnego oraz składu zmodyfikowanego TiO<sub>2</sub> w ilości 30 kg/m<sup>3</sup>. W przypadku wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, zaobserwowano najwyższe wyniki w przypadku składu zmodyfikowanego TiO<sub>2</sub> w ilości 20 kg/m<sup>3</sup>, który jednocześnie odznaczał się najwyższym przyrostem wytrzymałości w czasie do 28 dni.

## 7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie nanometrycznego TiO<sub>2</sub> wpływa na skurcz wczesny betonu oraz jego parametry wytrzymałościowe. Badania skurczu w trakcie pierwszych 72 h po zaformowaniu, oraz analiza wyników badań wytrzymałości na ściskanie po 3

i 28 dniach pielęgnacji pozwoliły na sformułowanie wniosków:

- wraz ze wzrostem zawartości TiO<sub>2</sub> w składzie mieszanki betonowej, odkształcenia skurczowe rosną, a skurcz wczesny betonów fotokatalitycznych przybiera wielkości ponad dwukrotnie większe (1,72 mm/m) niż betonów niemodyfikowanych (0,922 mm/m);
- wraz ze wzrostem zawartości TiO<sub>2</sub> w mieszance betonowej, odkształcenia skurczowe oraz wczesna wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu wykazywały tendencję wzrostową;
- najwyższe wyniki wytrzymałości wczesnej (po 3 dniach) osiągnęły próbki betonowe niemodyfikowane fotokatalizatorem oraz betony zmodyfikowane TiO<sub>2</sub> w ilości 30 kg/m<sup>3</sup>;
- skład TiO<sub>2</sub>-20 osiągnął najkorzystniejsze parametry wytrzymałościowe po 28 dniach oraz najbardziej efektywnie rozwinął wytrzymałość w czasie. Jednak biorąc pod uwagę znaczny przyrost odkształceń skurczowych (ponad 80% względem składu referencyjnego), nie jest składem optymalnym;
- najniższe wyniki wytrzymałości na ściskanie, zarówno wytrzymałości wczesnej jak i wytrzymałości po 28 dniach, osiągnięto w przypadku próbek z zawartością dwutlenku tytanu na poziomie 10 kg/m.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Kalinowski M., Chilmon K., Jackiewicz-Rek W., Carbon-Negative Nano-TiO<sub>2</sub>-Modified Photocatalytic Cementitious Composites: Removal of Airborne Pollutants (NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub>) and Its Impact on CO<sub>2</sub> Footprint, *Coatings* 14, 2024, art. 1607
- [2] Chilmon K., Kalinowski M., Jackiewicz-Rek W., Effect of Cement Substitution with Mineral Fillers on NO<sub>x</sub> Air-Purification Efficiency and Photocatalytic Reaction Selectivity of Nano-TiO<sub>2</sub>-Modified Cementitious Composites, *Materials* 17, 23, 2024, art. 5775
- [3] Chilmon K., Kalinowski M., Jackiewicz-Rek W., Influence of Coarse Aggregate Exposure on Air Purification Efficiency in Photocatalytic Cement Composites. *Buildings* 11, 14, 2024, art. 3639
- [4] Kalinowski M., Chilmon K., Bogacki J., Woyciechowski P., Organic and Inorganic Modifications to Increase the Efficiency in Immobilization of Heavy Metal (Zn) in Cementitious Composites – The Impact of Cement Pore Network Characteristics, *Materials* 17, 2024, art. 5281
- [5] Witkowski H., Jarosławski J., Szkop A., Chilmon K., Kalinowski M., Jackiewicz-Rek W., The Potential Risk of Nanoparticulate Release from Photocatalytic Pavement Concrete Surface Due to a Simulated Abrasion Load – An Experimental Study *Materials* 17, 2024, art. 3022
- [6] Kalinowski M., Chilmon K., Kuziak J., Łukowski P., Jackiewicz-Rek W., Photocatalytically Induced Degradation of Nano-TiO<sub>2</sub>-Modified Paint Coatings Under Low-Radiation Conditions, *Coatings* 2025, 15, 281
- [7] Kalinowski M., Chilmon K., Jackiewicz-Rek W., Photocatalytic Performance of Cementitious Composites Modified with Second-Generation Nano-TiO<sub>2</sub> Dispersions: Influence of Composition and Granulation on NO<sub>x</sub> Purification Efficiency, *Coatings* 15, 2025, art. 148
- [8] A. D. McNaught A., Wilkinson UPAC Compendium of Chemical Terminology, International Union of Pure and Applied Chemistry, 2025
- [9] Ochiai T., Fujishima A., Photoelectrochemical properties of TiO<sub>2</sub> photocatalyst and its applications for environmental purification *13*, 4/2012, str. 247–262
- [10] Chilmon K., Jackiewicz-Rek W., Beton fotokatalityczny a możliwość oczyszczania powietrza, *Budownictwo, Technologie, Architektura* 2/2019, str. 66–69
- [11] Deja J., Beton – technologie i metody badań, praca zbiorowa, redakcja naukowa, 2020
- [12] Dziuk D. i in., Porównanie wybranych metod ograniczenia skurczu betonu, 2016
- [13] Neville A. M., Właściwości betonu, 2012
- [14] Allena S., Newton C. M., State-of-the-art review on early-age shrinkage of concrete, 2014
- [15] ÖENORM B 3329:2009-06-01: Prüfverfahren für Betone – Bestimmung des Frühschwundes
- [16] PN-EN 12350-2: Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- [17] PN-EN 12390-3: Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań

# Budowla historyczna – współczesny projekt: żelbetowa konstrukcja ponadczasowej murowej budowli sakralnej

Historical building – contemporary design: the reinforced concrete structure of a timeless masonry sacred architecture

inż. Kinga Kapuścińska, dr inż. Maria Włodarczyk (ORCID: 0000-0002-9094-3410), Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7436

**Streszczenie:** Ewolucja budownictwa na przestrzeni wieków wyznacza drogę od monumentalnych i ciężkich konstrukcji murowanych ku nowoczesnym układom żelbetowym, które pozwalają na zupełnie nową interpretację klasycznych form sakralnych. Opracowanie koncentruje się na projekcie konstrukcyjnym wybranych elementów obiektu inspirowanego architekturą Bazyliki Świętego Witalisa w Rawennie, dążąc do harmonijnego połączenia historycznej estetyki z współczesnym materiałem konstrukcyjnym jakim jest żelbet. Kluczowym założeniem pracy było wykorzystanie współczesnych materiałów niskoemisyjnych, co stanowi odpowiedź na potrzeby zrównoważonego projektowania w XXI wieku. Zakres prac obejmował wyznaczenie gabarytów oraz zaprojektowanie zbrojenia pięciu kluczowych elementów: kopuły, płyty stropodachu, belki obwodowej, słupa oraz stopy fundamentowej. Analizę statyczno-wytrzymałościową oparto na aktualnych standardach normowych PN-EN, łącząc metody analityczne z modelowaniem numerycznym w programie Autodesk Robot Structural Analysis 2025. Efektem końcowym jest spójna dokumentacja projektowa, stanowiąca nowoczesny hołd inżynierski dla bizantyjskiego dziedzictwa, łączący szacunek do tradycji ze spojrzeniem w przyszłość zrównoważonego budownictwa.

**Słowa kluczowe:** kopuła, konstrukcja żelbetowa, kościół, dekarbonizacja, niskoemisyjność.

**Abstract:** The evolution of construction over the centuries has paved the way from monumental masonry structures toward modern reinforced concrete systems, enabling a novel interpretation of classical sacral forms. This study focuses on the structural design of selected elements of a building inspired by the architecture of the Basilica of San Vitale in Ravenna, seeking a harmonious synthesis of historical aesthetics and modern reinforced concrete. A key premise of the work was the use of contemporary low-emission materials, addressing the demands of sustainable design in the 21st century. The scope of the work encompassed determining the dimensions and designing the reinforcement for five key components: the dome, roof slab, edge beam, column, and pad foundation. The structural analysis was based on current PN-EN standards, combining analytical methods with numerical modeling in Autodesk Robot Structural Analysis 2025. The final result is a cohesive set of design documentation that serves as a modern engineering tribute to Byzantine heritage, blending respect for tradition with a vision for the future of sustainable construction.

**Keywords:** dome, reinforced concrete structure, church, decarbonization, low-emission materials.

## 1. Wprowadzenie

Na przestrzeni wieków projektując obiekty pełniące funkcje sakralną poszukiwano form stwarzających zarówno niezwykle efekty wizualne, jak i funkcjonalne. Obiekty te miały wywoływać w odwiedzających określone emocje i duchowe przeżycia. Budynki sakralne stanowiły przestrzeń zgromadzeń wiernych, dlatego poszukiwano rozwiązań pozwalających na uzyskanie dużych przestrzeni bez dodatkowych podpór ograniczających widoczność centralnego punktu obiektu sakralnego jakim był ołtarz. Odpowiedzią na te potrzeby było zastosowanie przekryć w formie kopuł [1], które tworzyły unikalne i efektowne bryły architektoniczne. Postrzegane były one jako obiekty o symbolicznym znaczeniu

reprezentujące doskonałość i wieczność. Uważane były za łącznik pomiędzy niebem i ziemią.

Pierwsze kopuły powstały już w starożytności [2] i w swoim czasie wyprzedzały współczesne rozumienie sztuki inżynierskiej, opartej na precyzyjnych analizach obliczeniowych. Przy wznoszeniu pierwszych kopuł kierowano się intuicją i wyczuciem pracy konstrukcji bez udziału skomplikowanych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych.

Historia budownictwa sakralnego udowadnia, że dążenie do architektonicznej doskonałości nie zna granic czasowych, a jedynie ograniczenia materiałowe. Dzisiaj dysponując precyzyjnymi narzędziami obliczeniowymi i nowymi technologiami materiałowymi, inżynier może zinterpretować te klasyczne formy na nowo.

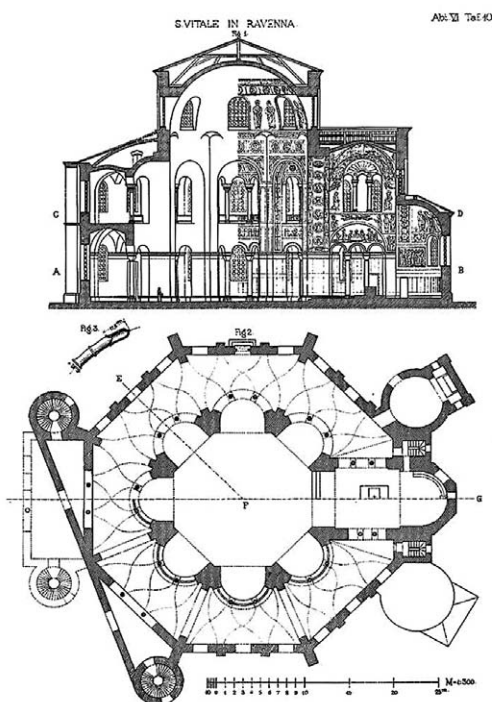
W artykule przedstawiono projekt konstrukcji wybranych elementów budowli sakralnej inspirowanej architekturą Bazyliki Świętego Witalisa w Rawennie [3] z wykorzystaniem współcześnie stosowanego materiału, jakim jest żelbet monolityczny. Artykuł został przygotowany w oparciu o pracę dyplomową inżynierską [4].

## 2. Bazylika Świętego Witalisa w Rawennie

Bazylika Świętego Witalisa wzniesiona w 548 roku we włoskim mieście Rawenna (rys. 1) stanowi jeden z ważniejszych przykładów sztuki bizantyjskiej w Europie Zachodniej. Jej nietypowa geometria nieustannie budzi podziw odwiedzających, a wyjątkową wartość obiektu potwierdzono w 1996 roku, wpisując go na listę światowego dziedzictwa UNESCO. Bazylika Świętego Witalisa to unikatowy przykład sztuki wczesnobizantyjskiej który charakteryzują ceglane bazyliki ozdobione w liczne mozaiki. Obiekt ten, w przeciwieństwie do typowej bazyliki na planie krzyża greckiego, został skonstruowany na planie ośmioboku zgodnie z zasadami



Rys. 1. Widok ogólny Bazyliki Świętego Witalisa [5]



Rys. 2. Przekrój i rzut Bazyliki Świętego Witalisa [6]

układu centralnego (rys. 2). Do szczególnych cech tego budynku należą złożone bryły obejmujące kolumny, łuki i sklepienia oraz lekka kopuła.

Budynek ma około 32 m długości i szerokości oraz 30 m wysokości. Składa się z dwóch ośmiokątnych graniastosłupów. Zewnętrzny niższy przekryty jest systemem sklepień. W centralnej części przestrzeni znajduje się wewnętrzny wyższy graniastosłup przekryty kopułą o średnicy około 16 m, która oparta została na pendentywach. Z badań [3] wynika, że grubość sklepienia waha się od 16 do 24 cm z dokładnością do  $\pm 1$  cm. Kościół ma 8 głównych filarów, których zadaniem jest podtrzymanie kopuły. Mury bazyliki wykonano z cegieł o wymiarach 310x510x40 mm i bardzo grubych spoin zaprawy, których grubość do wymiarów cegły wynosiła 1:1. Grubość murowanych ścian znajdujących się wzdłuż zewnętrznych krawędzi obiektu wynosi około 90 cm.

## 3. Założenia projektowe

Przedmiotem opracowania jest wolnostojący budynek pełniący funkcję sakralną inspirowany bazyliką z VI wieku. W projekcie wykonanym w ramach pracy dyplomowej inżynierskiej [4] zdecydowano się na odtworzenie głównych i najbardziej charakterystycznych elementów historycznej architektury z zastosowaniem współcześnie stosowanej technologii. Kopułę, belki krawędziowe, płytę stropową, słupy i stopy fundamentowe zaprojektowano jako żelbetowe wykonane w technologii monolitycznej. W projekcie zastosowano mieszankę betonową o ograniczonym śladzie węglowym. Projekt został opracowany zgodnie z obecnie obowiązującymi normami [7–11].

### 3.1. Mieszanka betonowa

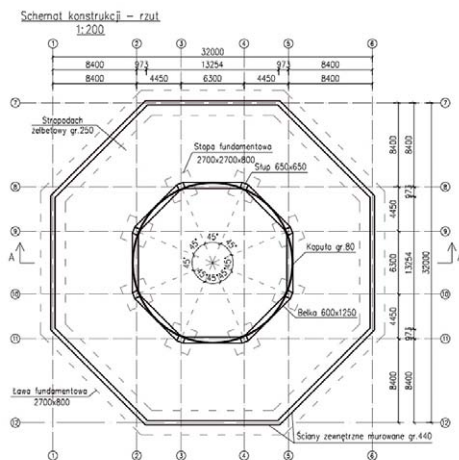
Dzięki innowacyjnym rozwiązaniom w zakresie projektowania mieszanek betonowych współczesne budownictwo dysponuje narzędziami umożliwiającymi tworzenie materiałów osiągających wyspecyfikowane właściwości wytrzymałościowe oraz minimalizujące problemy typowe dla tradycyjnych technologii, takich jak nadmierna emisja zanieczyszczeń czy zużycie zasobów.

W projekcie postawiono za cel nie tylko odtworzenie architektury obiektu, ale także zastosowanie rozwiązań i materiałów ograniczających negatywny wpływ na środowisko. W związku z tym zastosowano mieszankę betonową o ograniczonym śladzie węglowym w stosunku do typowo stosowanych mieszanek. W projekcie zastosowano beton klasy C25/30 opracowany na bazie cementu wieloskładnikowego CEM V/A (S-V) 42,5N LH/HSR/NA [12–14], który pozwala na redukcję emisji gazów cieplarnianych.

### 3.2. Opis konstrukcji

W projekcie zachowano charakterystyczne cechy obiektu historycznego stanowiącego inspirację architektoniczną do wykonania współczesnego projektu.

**Rys. 3.**  
Schemat konstrukcji – rzut



Projektowana konstrukcja to budowla centralna na planie ośmioboku foremnego o boku 13,3 m (rys. 3), którego układ konstrukcyjny stanowią kopuła o promieniu 8 m i grubości powłoki 8 cm, belki obwodowe o przekroju poprzecznym 60x125 cm, stropodach grubości płyty 25 cm, 8 słupów o przekroju 65x65 cm, ściany nośne znajdujące się na zewnętrznych krawędziach budynku oraz posadowienie bezpośrednie na stopach i ławach fundamentowych (rys. 4). Model 3D obiektu wykonany w programie Autodesk Revit 2025 pokazano na rysunku 5 [15].

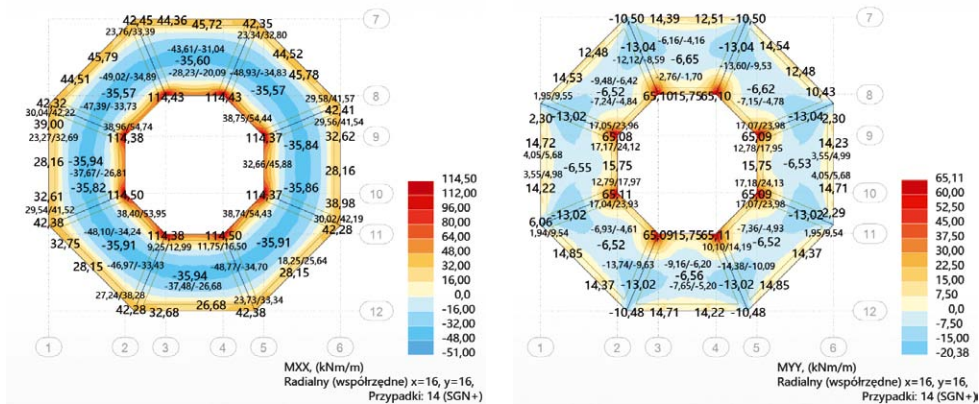
#### 4. Projektowane elementy konstrukcyjne i metodyka pracy

W przeciwieństwie do budowniczych z VI wieku, współczesny inżynier posiada narzędzia pozwalające na określenie pracy każdego elementu konstrukcji. Projektując elementy konstrukcyjne wykorzystano metodę analityczną i numeryczną. I tak dla oszacowanych oddziaływań na powierzchnię kopuły stosując bezmomentową teorię powłok obrotowych [16, 17], wyznaczano siły południkowe i równoleżnikowe. Na podstawie uzyskanych sił wewnętrznych oszacowano niezbędne zbrojenie powłoki przyjmując pręty średnicy 6 mm w rozstawie co 200 mm.

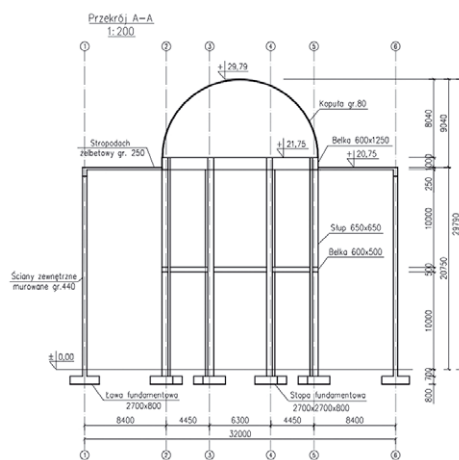
Momenty zginające dla projektowanej płyty stropowej wyznaczono w programie Autodesk Robot Structural Analysis 2025 [18].

Przyjęty model MES (Metoda Elementów Skończonych) pozwolił na precyzyjne wyznaczenie map momentów zginających oraz dobór zbrojenia z uwzględnieniem stanów granicznych nośności i użyteczności [11]. Mapy momentów

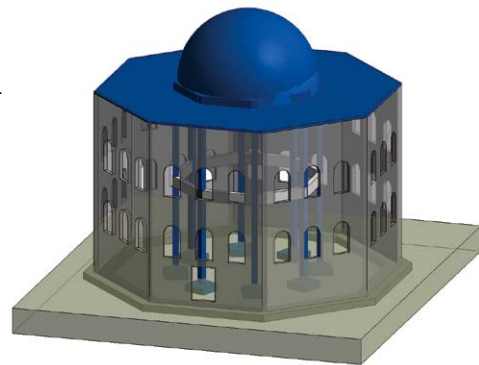
**Rys. 6.** Mapy momentów zginających  $M_{xx}$  i  $M_{yy}$  dla kombinacji SGN dla obwiedni górnej



**Rys. 4.**  
Schemat konstrukcji – przekrój



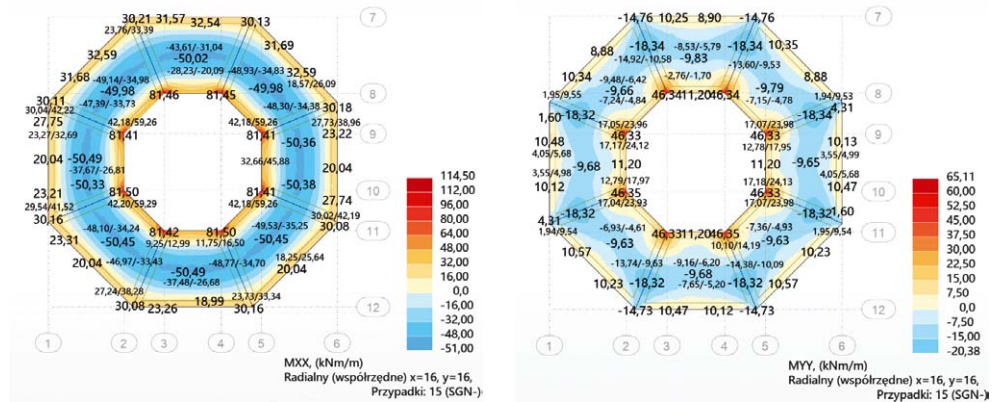
**Rys. 5.** Model projektowanego obiektu wykonany w programie Autodesk Revit 2025 z oznaczeniem kolorem niebieskim elementów będących zakresem analizy



zginających obwiedni górnej i dolnej uzyskane w programie przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Na podstawie map momentów zginających i map zbrojenia teoretycznego dobrano zbrojenie. W elemencie zastosowano siatkę podstawową  $\varnothing 10$  co 250 mm z dozbrojeniami w strefach przypodporowych prętami  $\varnothing 8$ ,  $\varnothing 10$  i  $\varnothing 16$ .

Projektowane belki tworzą zamknięty, ośmiokątny pierścień oparty w wierzchołkach na słupach. Ich głównym zadaniem jest przeniesienie obciążeń pionowych z kopuły kościoła na niższe partie budynku. Do wyznaczenia sił wewnętrznych belek obwodowych typu upstand również zastosowano oprogramowanie inżynierskie [18] do wyznaczenia sił przekrojowych (rys. 8), które posłużyły do oszacowania niezbędnej ilości zbrojenia [11]. W elementach tych zastosowano zbrojenie podłużne średnicy  $\varnothing 20$  oraz poprzeczne  $\varnothing 8$  jako strzemiona.

**Rys. 7.** Mapy momentów zginających  $M_{xx}$  i  $M_{yy}$  dla kombinacji SGN dla obwiedni dolnej

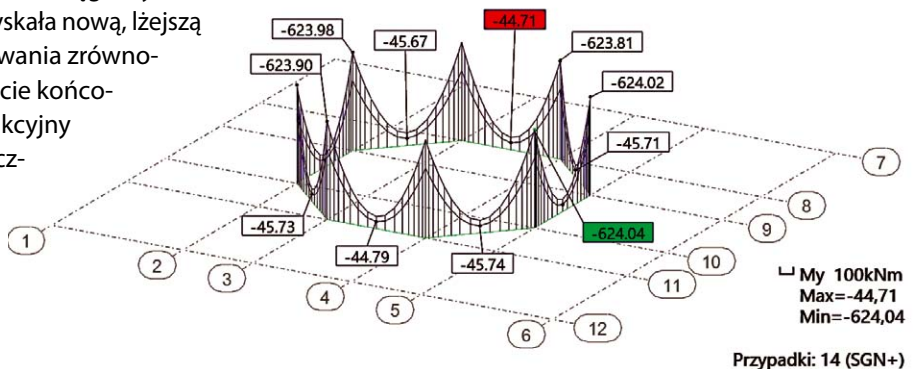


Konstrukcję wsporczą tworzy osiem słupów o przekrojach prostokątnych, posadowionych na stopach fundamentowych. Słupy zostały powiązane belkami obwodowymi w połowie oraz na końcach swojej wysokości, co tworzy sztywny układ i pozwala na istotne zmniejszenie długości wybożeniowej elementów. Zbrojenie podłużne słupów wykonano z 12 prętów zbrojeniowych średnicy 16 mm rozmieszczonych równomiernie w przekroju oraz strzemion wykonanych z prętów  $\varnothing 6$ . Przyjęto podstawowy rozstaw strzemion co 320 mm oraz w miejscu połączenia słupów z belkami i płytami oraz w miejscach połączenia prętów podłużnych na zakład zagęszczony do 190 mm. Budynek jest posadowiony na stopach i ławach fundamentowych. Żelbetowe stopy fundamentowe o wymiarach 2,7x2,7 m zostały zaprojektowane jako elementy zbrojone krzyżowo w każdym kierunku 12 prętami  $\varnothing 10$ . W celu zapewnienia ciągłości konstrukcyjnej, w stopach osadzone zbrojenie startowe do zbrojenia słupów, umożliwiające ich sztywne połączenie z fundamentem.

## 5. Podsumowanie

Zrealizowany projekt stanowi harmonijne spotkanie dwóch odległych epok, udowadniając, że historyczne kanony piękna i współczesna myśl inżynierska mogą tworzyć spójną całość. W pracy starano się zrównoważyć względy techniczne, ekonomiczne oraz estetyczne, czerpiąc inspirację z klasycznej formy włoskiej. Wykorzystanie monolitycznego żelbetu do reinterpretacji bizantyjskich form to nie tylko techniczna próba optymalizacji konstrukcji, ale przede wszystkim hołd złożony dawnym artystom, których prace miały wpływ na współczesną architekturę. Dzięki zastosowaniu komputerowych narzędzi obliczeniowych oraz materiałów o obniżonym śladzie węglowym, monumentalna bryła rzymskiej bazyliki zyskała nową, lżejszą interpretację, odpowiadającą na wyzwania zrównoważonego rozwoju XXI wieku. W efekcie końcowym uzyskano spójny projekt konstrukcyjny budynku, który łączy w sobie historyczne inspiracje z nowoczesnym zrównoważonym podejściem inżynierskim.

**Rys. 8.** Wykres momentów zginających w belkach dla kombinacji SGN



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ściśl C., Konstrukcje w nowoczesnej architekturze, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1974
- [2] Włodarczyk M., Szwed A., Analiza i projektowanie żelbetowych kopuł cienkościennych. Logistyka, 2010, 6CD, str. 3720–3719
- [3] Binda L., Roberti G., Guzzetti F., St. Vitale in Ravenna: A survey on materials and structures, symposium Bridging Large Spans: from Antiquity to the Present, Istambuł, 2000
- [4] Kapuścińska K., Budowla historyczna – Współczesny projekt: Żelbetowa konstrukcja ponadczasowej murejowej budowli sakralnej, praca dyplomowa inżynierska, Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Warszawska, 2025
- [5] Fot. Salvatore Leanza, Basilica of San Vitale exterior, dostępne w: <http://obrazsztuki.blogspot.com/2015/10/sztuka-bizantyjska-basilica-di-san.html> (dostęp: 13.04.2026)
- [6] Dehio G., von Bezold G., Die Kirchliche Baukunst des Abendlandes: Atlas, Stuttgart, Wydawnictwo Cotta, 1901
- [7] PN-EN 1990:2004: Eurokod 0: Podstawy projektowania konstrukcji
- [8] PN-EN 1991-1-1:2004. Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje Część 1-1: Oddziaływania ogólne, ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach
- [9] PN-EN 1991-1-3:2005: Eurokod 1: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem
- [10] PN-EN 1991-1-4:2008. Eurokod 1: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru
- [11] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [12] PN-EN 197-1:2002: Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności
- [13] PN-EN 450-1: 2006: Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [14] PN-EN 934-2:2002: Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Domieszki do betonu. Definicje i wymagania
- [15] Autodesk Revit 2025
- [16] Grabiec K., Żelbetowe konstrukcje cienkościennie, Wydawnictwo PWN, Warszawa, 1999
- [17] Flugge W., Powłoki. obliczenia statyczne, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1972
- [18] Autodesk Robot Structural Analysis, 2025

# Od tradycji do automatyzacji. Zastosowanie modelowania parametrycznego w projektowaniu konstrukcji żelbetowych na przykładzie budynku laboratorium

From tradition to automation. Application of parametric modeling in the design of reinforced concrete structures on the example of a laboratory building

inż. Bartłomiej Piróg, dr inż. Maria Włodarczyk (ORCID: 0000-0002-9094-3410), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7437

**Streszczenie:** Artykuł podejmuje problematykę optymalizacji procesu projektowania konstrukcji żelbetowych w odpowiedzi na wyzwania stawiane przez koncepcję Przemysłu 4.0. Tradycyjne, sekwencyjne metody modelowania na styku środowisk CAD i MES zastąpiono autorskim algorytmem opartym na projektowaniu parametrycznym (AAD) w środowisku Grasshopper. Opracowane rozwiązanie integruje automatyczne generowanie układu prętowego trzystrefowego budynku laboratorium z modulem inteligentnej aplikacji obciążeń klimatycznych i użytkowych, bazującym na topologii obiektu. Skrypt przeprowadza wstępną optymalizację materiałową przekrojów z wykorzystaniem silnika Karamba3D, a następnie realizuje bezstratny transfer kompletnego modelu analitycznego do docelowego programu obliczeniowego Dlubal RFEM 6. Przeprowadzona analiza porównawcza sił wewnętrznych potwierdziła wysoką zbieżność i rzetelność uproszczonego modelu statycznego. Wykazano, że algorytmizacja drastycznie redukuje czas niezbędny do wdrażania zmian koncepcyjnych oraz eliminuje błędy transferowe.

**Słowa kluczowe:** modelowanie parametryczne, Grasshopper, automatyzacja projektowania, konstrukcja żelbetowa, optymalizacja.

**Abstract:** The article addresses the optimization of the reinforced concrete structural design process in response to the challenges posed by the Industry 4.0 paradigm. Traditional, sequential modeling methods at the interface of CAD and FEM environments have been replaced with a proprietary algorithm based on Algorithmic Aided Design (AAD) within the Grasshopper environment. The developed solution integrates the automated generation of a three-zone laboratory building's spatial frame with a module for the intelligent application of climatic and live loads, based on the object's topology. The script performs preliminary material optimization of cross-sections using the Karamba3D engine, followed by a lossless transfer of the complete analytical model to the target structural analysis software, Dlubal RFEM 6. A comparative analysis of internal forces confirmed the high convergence and reliability of the simplified static model. It has been demonstrated that algorithmization drastically reduces the time required to implement conceptual changes and eliminates transfer errors.

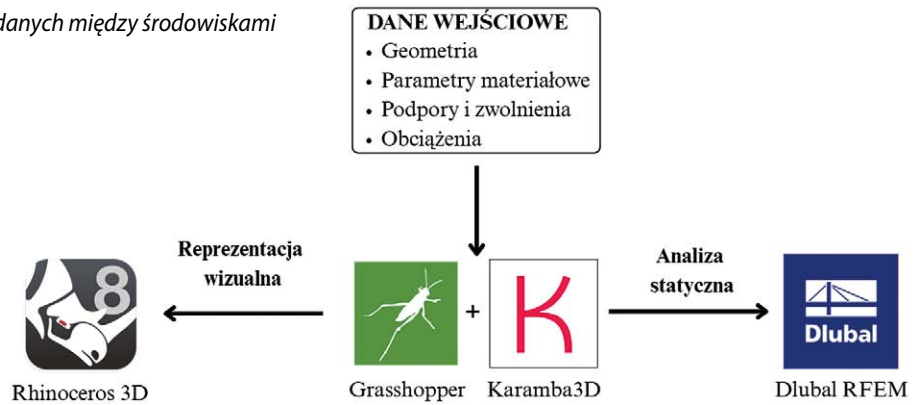
**Keywords:** parametric modeling, Grasshopper, design automation, reinforced concrete structure, optimization.

## 1. Wprowadzenie

Jubileusz 200-lecia Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej to moment skłaniający do refleksji nad fundamentalną ewolucją warsztatu inżyniera budownictwa. Przez dziesięciolecia kształcenie konstruktorów opierało się na klasycznej mechanice i żmudnych obliczeniach analitycznych. Współcześnie, w dobie czwartej rewolucji przemysłowej (Przemysł 4.0), ciężar wyzwań przeniósł się z samego rozwiązywania układów równań na efektywne zarządzanie modelem cyfrowym i potężnymi zbiorami danych [6]. Mimo że metodyka BIM (ang. *Building Information Modeling*) stała się wiodącym standardem na rynku, na styku dyscyplin architektury i konstrukcji wciąż funkcjonuje wyraźne

„wąskie gardło”. Klasyczne projektowanie z wykorzystaniem środowisk CAD (ang. *Computer-Aided Design*) oraz zaawansowanych systemów MES (Metoda Elementów Skończonych) opiera się na sekwencyjnym, wysoce statycznym przepływie informacji. W praktyce inżynierskiej oznacza to, że każda iteracyjna zmiana koncepcji architektonicznej na zaawansowanym etapie – taka jak modyfikacja rozpiętości osi, zmiana wysokości kondygnacji czy przesunięcie układu słupów – zmusza projektanta konstrukcji do manualnej, czasochłonnej przebudowy całego modelu analitycznego. Wiąże się to z koniecznością ponownego, ręcznego definiowania geometrii węzłów, przypisywania sztywności oraz generowania od nowa powierzchni obciążeń. Taki proces jest nie tylko wysoce nieefektywny, ale również stwarza

**Rys. 1.** Diagram reprezentujący przepływ danych między środowiskami projektowymi



ogromne ryzyko błędów ludzkich na etapie transferu danych.

Innowacyjnym kierunkiem pozwalającym na przewyższenie tych ograniczeń jest *Algorithmic Aided Design* (AAD), czyli projektowanie wspomagane algorytmicznie. Technika modelowania parametrycznego umożliwia zdefiniowanie geometrii ustroju nośnego nie poprzez statyczne współrzędne, lecz za pomocą zestawu logicznych reguł i powiązanych ze sobą zmiennych matematycznych [7]. W tym ujęciu konstruktor nie „rysuje” belek i słupów, lecz programuje logikę ich powstawania. Dzięki temu modyfikacja nawet jednego parametru wejściowego (np. całkowitej szerokości traktu) powoduje kaskadową, zautomatyzowaną przebudowę całej struktury przestrzennej w czasie rzeczywistym.

Celem niniejszego artykułu jest prezentacja autorskiego, elastycznego narzędzia automatyzującego projektowanie żelbetowego szkieletu nośnego, opracowanego w środowisku programowania wizualnego. Artykuł powstał na podstawie pracy inżynierskiej pt. „Zastosowanie modelowania parametrycznego w procesie automatyzacji projektowania konstrukcji żelbetowej na przykładzie budynku laboratorium” [8]. W pracy wykazano, w jaki sposób jeden zintegrowany skrypt potrafi wygenerować złożoną geometrię, w sposób zautomatyzowany przypisać obciążenia na elementy prętowe, przeprowadzić wstępną optymalizację materiałową oraz bezstratnie wyeksportować analityczny model do docelowego programu obliczeniowego MES. Opracowane rozwiązanie stanowi bezpośrednią odpowiedź na potrzebę optymalizacji współczesnego procesu inwestycyjnego [9].

## 2. Narzędzia i środowisko pracy

Skuteczna automatyzacja wymaga wyeliminowania pośrednich formatów wymiany plików (jak klasyczne, niekiedy stratne pliki IFC – *Industry Foundation Classes*), na rzecz bezpośredniej komunikacji poprzez API (*Application Programming Interface*). Wdrożony przepływ pracy (workflow) oparto na zintegrowanym środowisku trzech narzędzi (rys. 1):

- Rhinoceros 3D i Grasshopper: Program Rhinoceros stanowi interfejs graficzny dla geometrii, natomiast zintegrowany z nim Grasshopper pełni rolę silnika logicznego. Jest to środowisko programowania wizualnego, w którym kod tworzy się poprzez łączenie bloków funkcyjnych (komponentów) przekazujących sobie dane za pomocą połączeń logicznych (ang. wires) [5];
- Karamba3D: Moduł zintegrowany z Grasshopperem, pozwalający na szybką i interaktywną analizę statyczną

z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Służy on w skrypcie do wstępnej weryfikacji nośności, ugięć oraz optymalizacji przekrojów (minimalizacji masy);

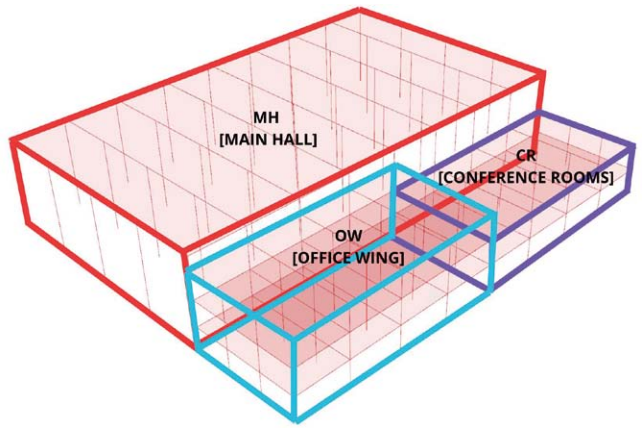
- Dlubal RFEM 6: Docelowe, zaawansowane oprogramowanie MES. Transfer danych z Grasshoppera zrealizowano za pomocą dedykowanej wtyczki (API), która tłumaczy strukturę danych algorytmu bezpośrednio na obiekty natywne programu RFEM (węzły, pręty, przekroje, materiały, przypadki obciążeń).

## 3. Studium przypadku – parametryczny model budynku laboratorium

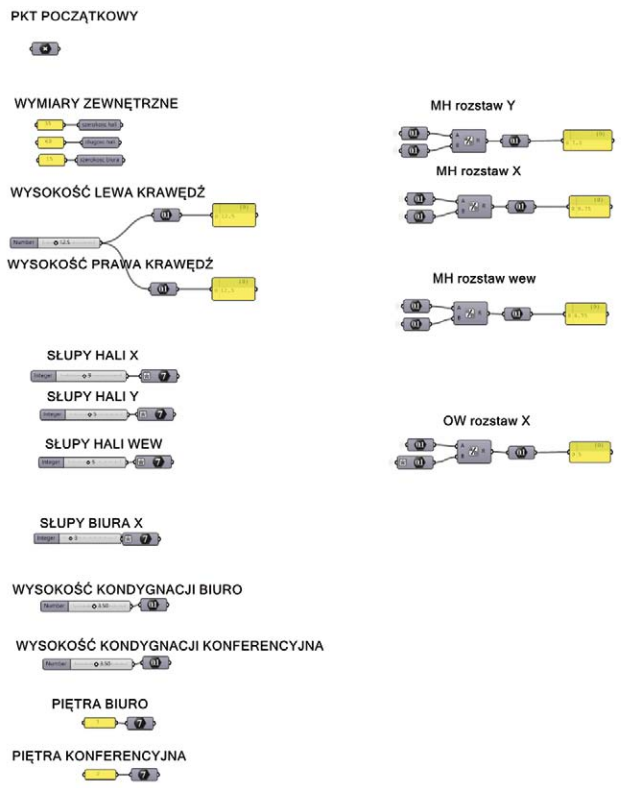
Aby udowodnić elastyczność algorytmu, jako obiekt badawczy przyjęto projektowany budynek laboratorium konstrukcji betonowych. Wybór ten nie był przypadkowy – obiekt charakteryzuje się niejednorodną bryłą, wymuszającą na skrypcie rozwiązywanie różnych problemów topologicznych w tym samym czasie (rys. 2). Budynek dzieli się na:

- halę główną – strefę jednokondygnacyjną o dużej rozpiętości (wymagającą masywnych dźwigarów i słupów),
- część biurową – układ trzykondygnacyjny o gęstszej siatce słupów,
- strefę konferencyjną – część o obniżonej wysokości, wprowadzający niejednorodność linii dachu.

Konstrukcję nośną zaprojektowano jako układ szkieletowy (słupowo-belkowy) z posadowieniem na stopach fundamentowych. Proces generowania geometrii w Grasshopperze nie polegał na tradycyjnym „rysowaniu” linii, lecz na zdefiniowaniu algorytmu topologicznego. Zmiennymi wejściowymi (zdefiniowanymi za pomocą suwaków liczbowych) (rys. 3) były m.in.: wymiary w rzucie dla każdej ze stref, rozstaw ram głównych, liczba kondygnacji oraz docelowe rzędne wysokościowe. Na podstawie tych parametrów skrypt automatycznie generuje siatkę przestrzenną, wyodrębniając z niej listy punktów węzłowych, a następnie łącząc je w elementy liniowe. Kluczowym zabiegiem było zastosowanie filtrów segregujących wygenerowane linie na zbiory: słupy hali, słupy biurowca, belki główne, dźwigary dachowe. Dzięki temu, w dalszej części skryptu, możliwe było jednoznaczne przypisanie im odpowiednich klas betonu i prętów zbrojeniowych.



Rys. 2. Podział budynku na poszczególne sektory



Rys. 3. Parametry początkowe

#### 4. Implementacja, generowanie obciążeń i optymalizacja

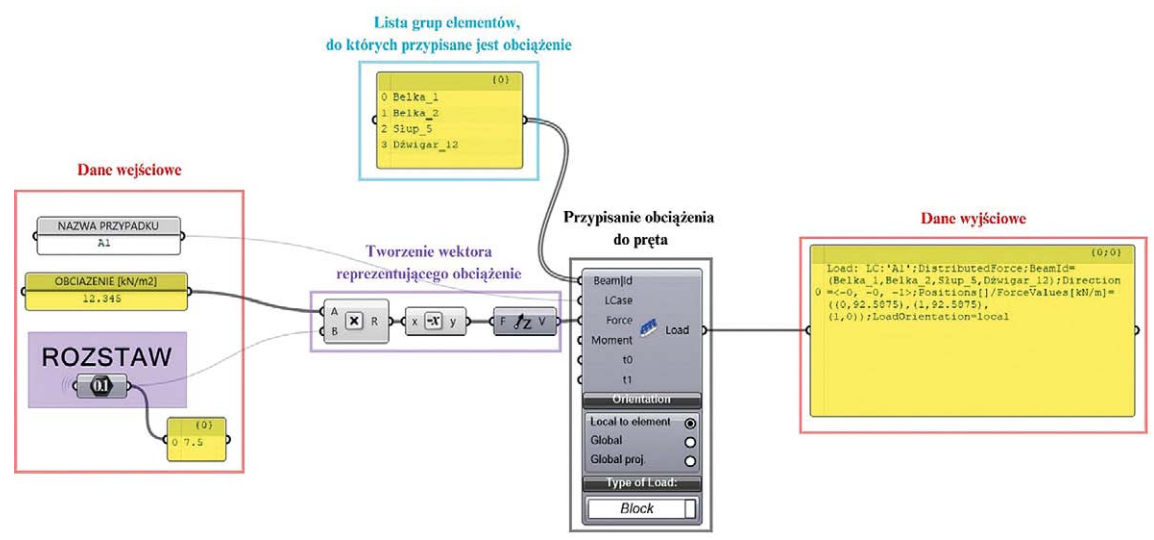
Kolejnym etapem procesu było zautomatyzowane nałożenie obciążeń. Tradycyjne wprowadzanie sił na poszczególne pręty w programach MES bywa czasochłonne, zwłaszcza przy zmianach siatki słupów. W opracowanym algorytmie, obciążenia stałe, wykończeniowe i zmienne (użytkowe) zostały zdefiniowane analitycznie i powiązane z powierzchniami trybutarnymi poszczególnych stref (rys. 4) (np. obciążenie stropów biurowych o wartości  $3,0 \text{ kN/m}^2$  [1]). Szczególną uwagę poświęcono obciążeniom klimatycznym. Algorytm wyposażono w moduł przeliczający oddziaływanie wiatru (I strefa wiatrowa) oraz śniegu (II strefa) zgodnie z obowiązującymi Eurokodami (PN-EN 1991-1-3:2005 [2], PN-EN 1991-1-4:2008 [3]). Skrypt automatycznie rozpoznaje kąty nachylenia połączy oraz powierzchnie ścian zewnętrznych i zewnętrznych, zamieniając ciśnienie powierzchniowe na obciążenia liniowe aplikowane bezpośrednio na elementy ramy.

Wstępna weryfikacja statyczna została przeprowadzona za pomocą wtyczki Karamba3D. Moduł optymalizacyjny (*Optimize Cross Section*) przeszukał zdefiniowaną wcześniej bazę katalogową przekrojów żelbetowych. Algorytm przypisał każdemu elementowi najmniejszy możliwy przekrój poprzeczny, przy którym spełniony został warunek stanu granicznego nośności (SGN) [4] – przyjęto maksymalny wskaźnik wykorzystania na poziomie 80%, zapewniając bezpieczny margines na dokładne przeliczenia reologiczne i docelowe wymiarowanie zbrojenia w środowisku MES.

#### 5. Weryfikacja dokładności transferu danych (Karamba3D vs RFEM 6)

Zwieńczeniem procesu było wyeksportowanie kompletnego, zoptymalizowanego modelu do programu Dlubal RFEM 6. Transfer okazał się bezstratny – system poprawnie

Rys. 4. Schemat generowania obciążeń prętowych



odczytał węzły, zwolnienia, podpory punktowe, materiały oraz wszystkie wygenerowane przypadki i kombinacje obciążeń (rys. 5).

W celu weryfikacji poprawności działania uproszczonego silnika obliczeniowego zaimplementowanego w Grasshopperze, przeprowadzono analizę porównawczą sił wewnętrznych. Zestawiono wyniki wygenerowane natychmiastowo przez moduł Karamba3D z precyzyjnymi obliczeniami z programu RFEM 6 dla wybranych, reprezentatywnych elementów ramy.

**Tabela 1.** Porównanie sił wewnętrznych między modulem Karamba3D a programem Dlubal RFEM 6

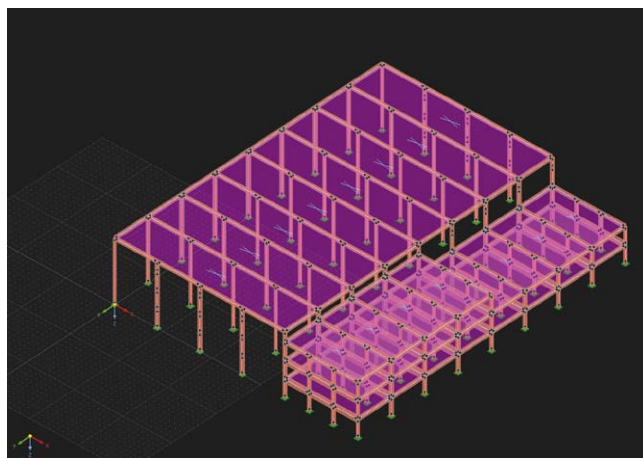
| Siły wewnętrzne                   | Karamba3D   | Dlubal RFEM 6 | Różnica [%] |
|-----------------------------------|-------------|---------------|-------------|
| Wybrana belka stropowa części OW  |             |               |             |
| Min. $F_x$                        | -9,81 kN    | -10,61 kN     | 7,5         |
| Max. $M_y$                        | 353,35 kNm  | 384,48 kNm    | 8,1         |
| Wybrany słup wewnętrzny części OW |             |               |             |
| Min. $F_x$                        | -1311,46 kN | -1407,53 kN   | 6,8         |
| Max. $M_y$                        | 39,78 kN    | 43,20 kN      | 7,9         |

Różnica w obydwu przypadkach wynosi od 6,8 do 8,1%, co może budzić wątpliwości, czy dobrane przez algorytm przekroje, spełnią warunki SGN i SGU na późniejszym etapie obliczeń. Różnica ta została jednak uwzględniona globalnie dla całego modelu, poprzez przyjęcie wymiarowania na 80%. Zachowany zapas nośności uwzględnia możliwe niedoszacowanie i pozostawia konstrukcję oraz następujące decyzje projektanta po bezpiecznej stronie. Nieduże odchylenia wynikają ze specyfiki algorytmów macierzowych obu programów oraz różnic w dyskretyzacji elementów prętowych. Potwierdza to fakt, że model wygenerowany i obciążony na poziomie języka skryptowego jest w pełni miarodajny i z powodzeniem może stanowić bezpośrednią bazę do końcowego wymiarowania zbrojenia w wyspecjalizowanych narzędziach.

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza i zrealizowane studium przypadku potwierdzają ogromny potencjał, jaki niesie ze sobą integracja modelowania parametrycznego z tradycyjnymi systemami MES. Główne wnioski płynące z zastosowania opracowanego algorytmu podano poniżej.

- Redukcja czasu i nakładu pracy: zmiana koncepcji architektonicznej (np. modyfikacja gabarytów budynku) wiąże się jedynie ze zmianą kilku parametrów wejściowych w Grasshopperze. Algorytm w czasie rzeczywistym przebudowuje



**Rys. 5.** Model wyeksportowany do programu Dlubal RFEM

bryłę, aktualizuje strefy obciążenia wiatrem/śniegiem i wysłała nowy model do programu MES.

- Eliminacja błędów transferowych: bezpośrednie połączenie API między Grasshopperem a RFEM eliminuje błędy ludzkie (tzw. literówki) oraz problemy związane z wadliwym mapowaniem właściwości materiałowych, które często występują przy eksporcie plików w formatach otwartych.

- Optymalizacja materiałowa: zastosowanie algorytmów iteracyjnych pozwala na wstępne „odchudzenie” konstrukcji, co wpisuje się w postulaty budownictwa zrównoważonego i minimalizacji wbudowanego śladu węglowego.

Rozwój cyfrowych narzędzi analitycznych, udowodniony na przykładzie zaprezentowanego przepływu pracy, jest potwierdzeniem, że inżynieria lądowa w Polsce – ewoluując przez ostatnie dwa stulecia – wypracowała solidne podstawy, na których dziś z powodzeniem budowane są zaawansowane innowacje technologiczne.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1991-1-1:2004 Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje Część 1-1: Oddziaływania ogólne, ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach
- [2] PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem
- [3] PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru
- [4] PN-EN 1990:2004 Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji
- [5] Preisinger C., Heimrath M., Karamba – A toolkit for parametric structural design. Structural Engineering International, Structural Engineering International, 2014
- [6] Radwańska M., Metody komputerowe w wybranych zagadnieniach konstrukcji, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2010
- [7] Preisinger C., Linking Structure and Parametric Geometry, Architectural Design 83, 2/2013, str. 110–113
- [8] Piróg B., Zastosowanie modelowania parametrycznego w procesie automatyzacji projektowania konstrukcji żelbetowej na przykładzie budynku laboratorium, praca inżynierska, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2025
- [9] Gerber D. J., Lin S-H., Designing in complexity: Parametric modeling as a design representation in architecture, SIMULATION: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2013

# Ocena wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego za pomocą autorskiej metody analizy obrazu

Assessment of efflorescence on the surface of colored architectural concrete using an original image analysis method

mgr inż. Jakub Zabawski (ORCID: 0009-0002-2485-1435), dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek (ORCID: 0000-0001-6056-5458), Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7438

**Streszczenie:** Beton architektoniczny to materiał, który daje duże możliwości kształtowania form i estetyki w projektach architektonicznych. Dzięki współpracy projektantów, technologów i wykonawców może on przybierać trwałe i atrakcyjne wizualnie postaci. Jego szerokie zastosowanie wynika z uniwersalności, szczególnie widocznej w przestrzeniach publicznych, gdzie coraz częściej wykorzystuje się go do wykonywania barwnych elewacji, elementów wnętrza oraz nawierzchni. Jednocześnie brak spójnych metod oceny trwałości koloru betonu barwionego utrudnia rzetelną analizę jego odporności na działanie czynników degradujących. Zmiany barwy mogą być efektem oddziaływania promieniowania UV, zanieczyszczeń, uszkodzeń mechanicznych oraz pojawiania się wykwitów. W pracy zaproponowano nową metodę oceny wykwitów węglanowych na powierzchni barwionych betonów architektonicznych poddanych przyspieszonemu starzeniu. Badania przeprowadzono na próbkach różniących się rodzajem i zawartością cementu oraz pigmentów. Do oceny zmian barwy wykorzystano spektrofotometr, natomiast analizę zmian powierzchniowych wykonano algorytmicznie na podstawie skanów wysokiej rozdzielczości w środowisku Python. Uzyskane wyniki pozwoliły sformułować praktyczne zalecenia dotyczące zastosowania zaproponowanej metody w kontroli jakości elementów z betonu barwionego.

**Słowa kluczowe:** barwiony beton architektoniczny, elewacje, cement, pigment, analiza zmian powierzchniowych.

**Abstract:** Architectural concrete is a material that offers extensive possibilities for shaping forms and aesthetics in architectural projects. Through collaboration between designers, engineers, and contractors, it can take on durable and visually appealing forms. Its widespread use stems from its versatility, particularly evident in public spaces, where it is increasingly employed for colorful facades, interior elements, and pavements. At the same time, the lack of consistent methods for assessing the color durability of colored concrete hinders a reliable analysis of its resistance to degrading factors. Color changes may result from exposure to UV radiation, pollution, mechanical damage, and the appearance of efflorescence. This study proposes a new method for assessing carbonate efflorescence on the surface of colored architectural concrete subjected to accelerated aging. The tests were conducted on samples varying in the type and content of cement and pigments. A spectrophotometer was used to assess color changes, while surface changes were analyzed algorithmically based on high-resolution scans in a Python environment. The results obtained allowed for the development of practical recommendations regarding the application of the proposed method in the quality control of colored concrete elements.

**Keywords:** colored architectural concrete, facades, cement, pigment, analysis of surface changes.

## 1. Wprowadzenie

W ostatnich dekadach zauważalnie wzrosło zainteresowanie barwionym betonem architektonicznym ze względu na atrakcyjny potencjał estetyczny oraz możliwość do kreowania unikalnych i innowacyjnych konstrukcji z tego materiału. Estetyka i uniwersalność tego typu betonu sprawiają, że coraz częściej jest on preferowanym wyborem przez projektantów i architektów na całym świecie, znajdując zastosowanie w różnorodnych projektach budowlanych. Uniwersalny charakter tego materiału sprawia, że jest powszechnie wykorzystywany w różnych

inwestycjach budowlanych, zwłaszcza w przestrzeni publicznej. Coraz częściej można tam spotkać elementy z betonu barwionego, takie jak fasady budynków czy nawierzchnie, które stają się charakterystycznym składnikiem współczesnej architektury. W Polsce, w ostatnich latach, beton barwiony wykorzystano do kształtowania formy wielu obiektów publicznych, szczególnie muzealnych np. Muzeum Wojska Polskiego na Warszawskiej Cytadeli, Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Warszawie (rys. 1), Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku czy też Muzeum Józefa Piłsudskiego w Sulejówku. Z uwagi na brak normowych metod oceny koloru i stanu powierzchni barwionego betonu

architektonicznego zdecydowano się na podjęcie próby opracowania uniwersalnej metody do automatycznej analizy obrazu i za jej pomocą oceny wykwitów na powierzchni betonu. Badania przeprowadzono na próbkach betonu zróżnicowanych pod względem rodzaju i ilości cementu, i pigmentów. Zmiany barwy określono za pomocą spektrofotometru, natomiast zakres zmian powierzchniowych analizowano algorytmicznie na podstawie skanów wysokiej rozdzielczości przy użyciu środowiska programistycznego Python. Sformułowane wnioski dostarczają praktycznych wytycznych dotyczących wdrożenia proponowanej metodyki w procesie kontroli jakości elementów z betonu barwionego.

## 2. Beton architektoniczny

Beton architektoniczny stanowi wyjątkowy materiał, który w rękach architektów i projektantów może przybrać atrakcyjne, trwałe formy realizowane przez technologów i wykonawców konstrukcji. O ile stosowanie betonu zwykłego, o różnych klasach i parametrach, zazwyczaj nie sprawia większych trudności wykonawczych, o tyle w przypadku betonu architektonicznego konieczne jest odpowiednie przygotowanie i większa dbałość o szczegóły. Kluczowe znaczenie ma tu jakość powierzchni, której kształtowanie rozpoczyna się już na etapie projektowym. Wówczas określa się nie tylko geometrię elementu, jego wymiary, zbrojenie czy grubość otuliny, lecz także cechy estetyczne, takie jak kolor, faktura i tekstura. Przyjęte założenia projektowe w istotny sposób wpływają na technologię wykonania oraz szereg czynników, które należy przewidzieć, a które bezpośrednio oddziałują na końcowy wygląd betonu licowego. Istotną rolę odgrywa również skład mieszanki betonowej, który starannie dobrany w połączeniu z odpowiednio dostosowaną technologią wykonawczą pozwala uzyskać zamierzony efekt architektoniczny powierzchni [1–4]. Jeśli uzyskany rezultat spełnia założenia projektowe, nie można pominąć kwestii zabezpieczenia powierzchni. Ochrona ta powinna obejmować zarówno etap budowy i wykańczania, jak i późniejszą eksploatację obiektu. Dotyczy to nie tylko właściwej pielęgnacji betonu, ale także zabezpieczenia przed działaniem czynników korozyjnych czy uszkodzeniami mechanicznymi, w tym aktami wandalizmu.



**Rys. 1.** Budynek Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Warszawie wykonany z białego betonu architektonicznego (materiały własne)

Współczesne technologie oferują szeroki wachlarz skutecznych środków ochrony powierzchni betonowych.

W krajowych dokumentach formalnych nie określono warunków wykonania ani kryteriów oceny jakości betonu architektonicznego. Niedostateczne uregulowanie tych kwestii utrudnia zapewnienie wymaganych parametrów estetycznych i użytkowych powierzchni betonu – szczególnie w zakresie równomierności zabarwienia czy też jednorodności kolorystycznej.

## 3. Barwienie powierzchni betonu

Oczekiwany efekt kolorystyczny betonu można uzyskać wyłącznie przy ścisłym przestrzeganiu zasad technologicznych zarówno na etapie projektowania, jak i realizacji elementu. Kluczowe znaczenie ma właściwy dobór składników mieszanki, w tym rodzaju cementu i kruszywa, a także zastosowanie odpowiednich pigmentów, które decydują o finalnej barwie mieszanki oraz wyglądzie powierzchni stwardniałego betonu. Procesy technologiczne prowadzące do uzyskania jednolitego koloru w całej objętości materiału określa się jako barwienie betonu „w masie”. Natomiast zmiana koloru ograniczona jedynie do warstwy zewnętrznej elementu nosi nazwę barwienia powierzchniowego. Barwa betonu stwardniałego zależy od wielu czynników, takich jak: ilość dozowanego pigmentu, współczynnik masowy pigment-spoivo, rodzaj cementu oraz jego skład chemiczny, kolor kruszywa, współczynnik wodno-cementowy, warunki dojrzewania betonu i warunki jego eksploatacji. Uzyskanie jednolitej barwy powierzchni betonu barwionego zależy od wielu czynników technologicznych. Kluczowe jest, aby kolejne partie mieszanki miały identyczną konsystencję, były przygotowywane z tych samych składników oraz odpowiednio zhomogenizowane. Trwałość barwy jest zależna od warunków ekspozycji na jakie powierzchnia betonowa została wystawiona – kolor będzie się zmieniał w zależności od środowiska. W środowisku przemysłowym i morskim, betony barwione wykazują znaczne zmiany koloru w stosunku do warunków kontrolowanych, przykładowo w komorze klimatycznej.

## 4. Pigmenty

Istnieje wiele różnych substancji barwiących, dzięki którym można uzyskać efekt barwienia, m.in. barwniki, laki i pigmenty. Pigmenty w odróżnieniu od barwników nie są rozpuszczalne w wodzie, dlatego też są bardziej efektywne w procesie barwienia betonu. Na rynku jest dostępnych wiele różnych rodzajów i kolorów pigmentów do betonu. Pigmenty różnią się formą, w której występują – dzielą się na pigmenty ciekłe, proszkowe, granulowane i kompaktowe. Najczęściej wykorzystywany rodzaj pigmentu jest to ten w formie dyspersji wodnej z uwagi na łatwość w aplikacji. Pigmenty wykorzystywane w produkcji barwionego betonu to głównie wysokoprocenowe tlenki żelaza, w tabeli 1 przedstawiono, jaki związek chemiczny odpowiada za konkretną barwę pigmentu.

Ponad te wymienione w tabeli 1 stosuje się również inne związki chemiczne, takie jak tlenki manganu, a także tlenki i wodorotlenki

**Tabela 1.** Skład chemiczny pigmentów

| Kolor pigmentu | Związek chemiczny                                  |
|----------------|--|
| Czerwony       | Tlenek żelaza                                      |
| Żółty          | Hydroksytlenek żelaza                              |
| Antracytowy    | Tlenek żelaza i/lub modyfikowana sadza techniczna  |
| Brązowy        | Mieszanina tlenków żelaza i hydroksytlenków żelaza |
| Pomarańczowy   | Mieszanina tlenków żelaza i hydroksytlenków żelaza |
| Biały          | Tlenek tytanu                                      |
| Zielony        | Tlenek chromu                                      |
| Niebieski      | Tlenek kobaltu, pigmenty ultramarynowe             |

kobaltu, glinu, niklu czy antymonu. Wykorzystuje się także zieleń i błękity ftalocyjaninowe oraz różnego rodzaju mieszaniny związków chemicznych [5]. Wyróżnia się ponadto tzw. pigmenty specjalne, które – poza funkcją barwiącą – charakteryzują się dodatkowymi właściwościami. Należą do nich m.in. wysoka stabilność chemiczna i termiczna, efekt metalicznego połysku, właściwości luminescencyjne oraz magnetyczne [6]. Wyróżnia się podział pigmentów na organiczne i nieorganiczne. Pigmenty nieorganiczne zazwyczaj nie wykazują negatywnego wpływu na proces wiązania cementu, a ich źródłem są głównie surowce mineralne. Ich skład chemiczny obejmuje przede wszystkim tlenki, siarczki oraz siarczany [7]. Z kolei pigmenty organiczne cechują się znacznie wyższą siłą barwienia – nawet do dziesięciokrotnie większą w porównaniu z pigmentami mineralnymi [8]. Ze względu na oddziaływanie różnorodnych czynników zewnętrznych dobór odpowiedniego pigmentu w projektowaniu mieszanki betonowej wymaga szczególnej staranności i dostosowania do założonych właściwości użytkowych oraz estetycznych. Długookresowe badania wyrobów betonowych w różnych kolorach wskazują, że najwyższą trwałością charakteryzują się pigmenty nieorganiczne, zwłaszcza tlenkowe, co wynika z ich stabilnej struktury i składu chemicznego [9]. Dodatek pigmentów nieorganicznych do mieszanek betonowych nie wpływa istotnie na ich reologię ani na parametry wytrzymałościowe stwardniałego betonu [10]. Tlenki żelaza stanowią podstawowy składnik wielu pigmentów barwiących, a uzyskiwane z ich udziałem kolory zależą od proporcji składników oraz warunków procesu technologicznego [11]. Pigmenty stosowane do barwienia betonu powinny spełniać wymagania normy PN-EN 12878 Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie. Wymagania i metody badań [N1]. Pigmenty nie są traktowane jako dodatki ani domieszki – tworzą osobną grupę modyfikatorów. Każdy pigment przeznaczony do barwienia betonu powinien charakteryzować się znaczną odpornością na wpływ światła i czynników atmosferycznych, a także intensywnie alkaliczne środowisko. Jednocześnie powinien gwarantować powtarzalność koloru w przypadku gotowych wyrobów [11]. Dozowanie pigmentów do mieszanki betonowej od jego rodzaju oraz od zaprojektowanego nasycenia barwy. Wielkość dozowania podaje

się w % masy spoiwa. Zwykle zalecane dozowanie pigmentów proszkowych wynosi 3–5%, a pigmentów ciekłych 4–6%. Typowe dozowanie pigmentów mieści się w przedziale 1–10%.

## 5. Wykwity na powierzchni betonu

Wykwity na powierzchni betonu stanowią niepożądane zjawisko, które często pojawia się w konstrukcjach betonowych, zwłaszcza tych ekspozowanych na działanie czynników atmosferycznych. Przyjmują one postać białych lub jasnych nalotów, występujących głównie na elewacjach, świeżo wykonanych prefabrykacjach oraz betonach architektonicznych. Choć ich obecność ma przede wszystkim charakter estetyczny, może również wskazywać na migrację soli oraz podwyższoną wilgotność materiału, co ma istotne znaczenie dla jego trwałości.

Wykwity najczęściej identyfikuje się metodami wizualnymi, jednak możliwe jest również zastosowanie bardziej zaawansowanych technik badawczych, takich jak skaningowa mikroskopia elektronowa SEM/EDS, umożliwiająca określenie składu chemicznego i morfologii wytrąconych soli, a także analiza spektroskopowa pozwalająca na ich charakterystykę mineralogiczną. Wykwity negatywnie wpływają na estetykę powierzchni, dlatego są szczególnie niepożądane w przypadku barwionych kompozytów cementowych, zarówno monolitycznych, jak i prefabrykowanych, w tym również kostki brukowej [12]. Zgodnie z wymaganiami norm oraz aprobat technicznych, wykwit węglanowy nie stanowi kryterium oceny jakości wyrobu [N2–N4]. Mimo że wykwity nie obniżają trwałości materiału, mają istotne znaczenie dla odbioru wizualnego, wpływając na postrzeganą jakość barwy oraz jej jednorodność, zwłaszcza w przypadku betonu architektonicznego w ciemnych odcieniach.

## 6. Cel i zakres badań

Celem badań przedstawionych w pracy była ocena możliwości wykorzystania analizy obrazu do identyfikacji i oceny wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego. W tym celu zaprojektowano, wykonano oraz przebadano 48 różnych składów betonów z dodatkiem pigmentów, co łącznie dało 288 próbek betonu barwionego (rys. 2).

Po 7 dniach pielęgnacji w warunkach komory klimatycznej ( $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $RH = 90 \pm 5\%$ ) próbki przygotowano do badań. Z próbek cylindrycznych odcinano górną powierzchnię, natomiast próbki prostokątne dzielono na dwie części. Nominalne wymiary próbek wynosiły:  $20 \times (40-50) \times 100$  mm dla próbek prostokątnych oraz  $20 \times 100$  mm dla próbek cylindrycznych. Zróżnicowanie szerokości próbek prostokątnych wynikało ze sposobu ich przygotowania poprzez przełamanie. Do badań wykorzystano 48 próbek cylindrycznych oraz 96 próbek prostokątnych. Próbki poddano przyspieszonemu starzeniu według autorskiej metody w komorze karbonatyzacyjnej. Powierzchnie analizowano przy użyciu skanera, a ich barwę określano spektrofotometrycznie przed rozpoczęciem cyklu starzenia, a następnie po 5 i 10 cyklach. Uzyskane obrazy poddano analizie graficznej.

W badaniach zastosowano betony barwione zróżnicowane pod względem rodzaju i zawartości cementu oraz rodzaju pigmentu. Przyjęto dwie zawartości cementu: 350 i 450 kg/m<sup>3</sup>. Zawartość pigmentu we wszystkich mieszankach wynosiła 8% masy spoiwa, natomiast domieszek 1% masy spoiwa. Współczynnik woda-cement był stały i wynosił 0,28. Ze względu na zastosowanie pigmentów w formie dyspersji wodnej, wodę z dyspersji uwzględniono w całkowitym bilansie w/c. Do wykonania próbek użyto czterech rodzajów cementu oraz pięciu różnych pigmentów.



Rys. 2. Próbkę betonu barwionego (materiały własne)

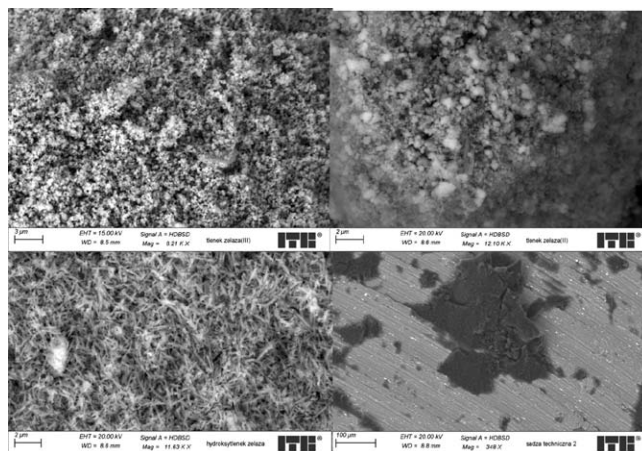
## 7. Materiały i wykonanie próbek

Do wykonania próbek zastosowano cztery różne cementy: cement portlandzki CEM I 42,5 R, cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V 42,5 R-NA, cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A-M (S-LL) 52,5 R i cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S 42,5 R spełniające wymagania normy [N5], piasek kopalniany o frakcji 0/2 zgodny z [N6], wodę zgodną z [N7].

W celu ograniczenia tworzenia się wykwitów węglanowych użyto domieszki uszczelniającej ATLAS Angucel ES-200 zgodnej z [N8]. Wykorzystano pięć różnych pigmentów w formie upłynnionej – trzy pigmenty o kolorze antracytowym (ATLAS COLOR SD-050 Kolor antracytowy – na bazie tlenków żelaza, ATLAS COLOR SD-800 Kolor antracytowy – na bazie wielocząsteczkowej sadzy technicznej i ATLAS COLOR SD-960 Kolor antracytowy – na bazie tlenków żelaza i modyfikowanej sadzy technicznej (mix)), jeden czerwony (ATLAS COLOR SR-040 Kolor czerwony – na bazie tlenków żelaza) i jeden żółty (ATLAS COLOR SY-020 Kolor żółty – na bazie tlenków żelaza).

Przeprowadzono również badania pigmentów z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej, które potwierdziły zróżnicowaną morfologię zastosowanych materiałów. Zaobserwowano wyraźne różnice w budowie cząstek w zależności od rodzaju pigmentu – od form o kształcie zbliżonym do sferycznego, aż po struktury igiełkowate oraz nieregularne (rys. 3). Próbkę betonowe wykonano według stałej procedury technologicznej, uwzględniającej ściśle określoną kolejność oraz czas dozowania i mieszania składników. Do wstępnie nasyczonego kruszywa, zawierającego połowę wody zarobowej, wprowadzano kolejno pigment, cement, pozostała ilość wody oraz domieszki uszczelniającą. Cały proces prowadzono przy zachowaniu ustalonych warunków i czasów mieszania, w celu zapewnienia pełnej homogenizacji składników (rys. 4).

Formowanie próbek przeprowadzono z zastosowaniem dwóch metod: prasy żyratorowej oraz prasy hydraulicznej. Zróżnicowany



Rys. 3. Pigmenty pod skaningowym mikroskopem elektronowym (materiały własne)



Rys. 4. Wykonywanie próbek betonu barwionego (materiały własne)

sposób zagęszczania mieszanki pozwolił na uzyskanie dwóch typów próbek – w postaci kostek (formowanych w prasie hydraulicznej) oraz cylindrów (formowanych w prasie żyratorowej). Próbkę po zaformowaniu umieszczono w komorze klimatycznej o stałej temperaturze i wilgotności (rys. 5).

## 8. Starzenie próbek betonowych barwionych

Opracowano autorską metodę przyspieszonego starzenia próbek betonowych barwionych, której celem było „pobudzenie” procesu powstawania ewentualnych wykwitów na ich powierzchni. Procedura polegała na cyklicznej zmianie warunków środowiskowych, w jakich przebywały próbki. Każdy cykl starzenia trwał 24 h i obejmował dwa etapy. W pierwszym etapie próbki umieszczano na 8 h w pojemniku z wodą destylowaną, przy czym były one zanurzone na 75% swojej wysokości. W warunkach tych,



Rys. 5. Próbkę w komorze klimatycznej (materiały własne)

w wyniku podciągania kapilarnego, łatwo wymywalne związki z matrycy cementowej były transportowane na powierzchnię próbek. W drugim etapie próbki przenoszono do komory karbonatyzacyjnej, gdzie przez 16 h przebywały w środowisku o  $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $RH = 70 \pm 5\%$  oraz stężeniu  $\text{CO}_2$  wynoszącym 3%. Przed badaniem spektrofotometrem oraz skanowaniem powierzchni próbki były suszone do stałej masy po 5 i 10 cyklach starzenia.

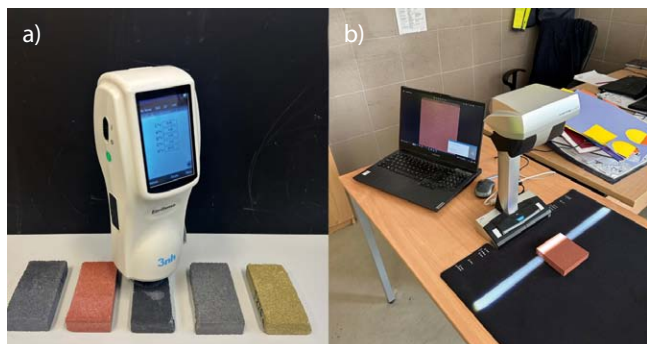
## 9. Metody badań

Skanowanie powierzchni próbek betonowych przeprowadzono w ściśle kontrolowanych warunkach oświetleniowych. W tym celu przygotowano pomieszczenie typu ciemnia, całkowicie odizolowane od światła zewnętrznego. Do rejestracji obrazów zastosowano skaner FUJITSU ScanSnap SV600 wyposażony w matrycę CCD (rys. 6). Urządzenie oświetlało próbki białym światłem emitowanym przez lampę LED zintegrowaną z układem skanującym. Próbki skanowano przed rozpoczęciem procedury przyspieszonego starzenia, a następnie w trakcie jej trwania – po 5 oraz 10 cyklach w komorze karbonatyzacyjnej. Przed każdym pomiarem próbki suszono do stałej masy, ponieważ ich barwa ulega zmianie wraz z zawartością wilgoci. Następnie były one skanowane pojedynczo na jednolitym tle, w celu zapewnienia powtarzalnych warunków pomiarowych. Pomiar barwy próbek betonowych barwionych wykonano z użyciem spektrofotometru NS800 firmy 3nh (rys. 6). Zgodnie z przyjętą metodyką na każdej próbce wykonywano 16 pomiarów w losowo wybranych punktach na jej górnej powierzchni. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono parametry barwy w przestrzeni CIELAB. Metoda spektrofotometryczna pozwala na opis koloru za pomocą trzech współrzędnych:  $L^*$ ,  $a^*$  oraz  $b^*$ . Składowa  $L^*$  określa jasność,  $a^*$  odpowiada za zakres barw od zieleni do czerwieni, natomiast  $b^*$  za zakres od błękitu do żółci. Różnicę barw określa się jako odległość między punktami w przestrzeni kolorymetrycznej, zgodnie ze wzorem (1):

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

gdzie:

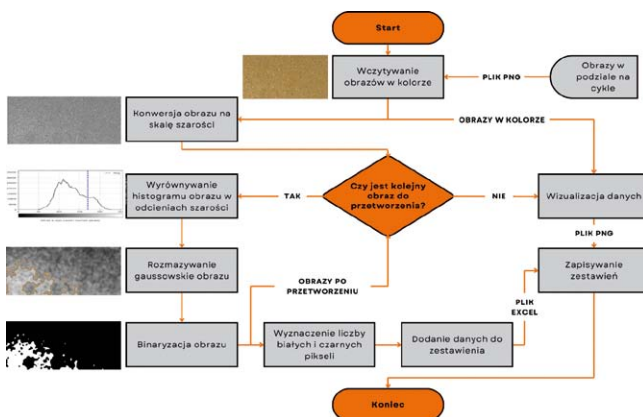
$\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  – różnice wartości każdej ze współrzędnych dwóch porównywanych barw psychofizycznych – próbki i wzorca;  
 $\Delta E_{ab}^*$  – różnica barw pomiędzy próbka a wzorcem.



**Rys. 6.** Badania próbek betonu barwionego: a) barwy z wykorzystaniem spektrofotometru, b) skan powierzchni

## 10. Automatycka analiza obrazu – algorytm

Algorytm do automatycznej analizy obrazu został stworzony w języku programowania Python. Schemat blokowy skryptu został przedstawiony na rysunku 7.

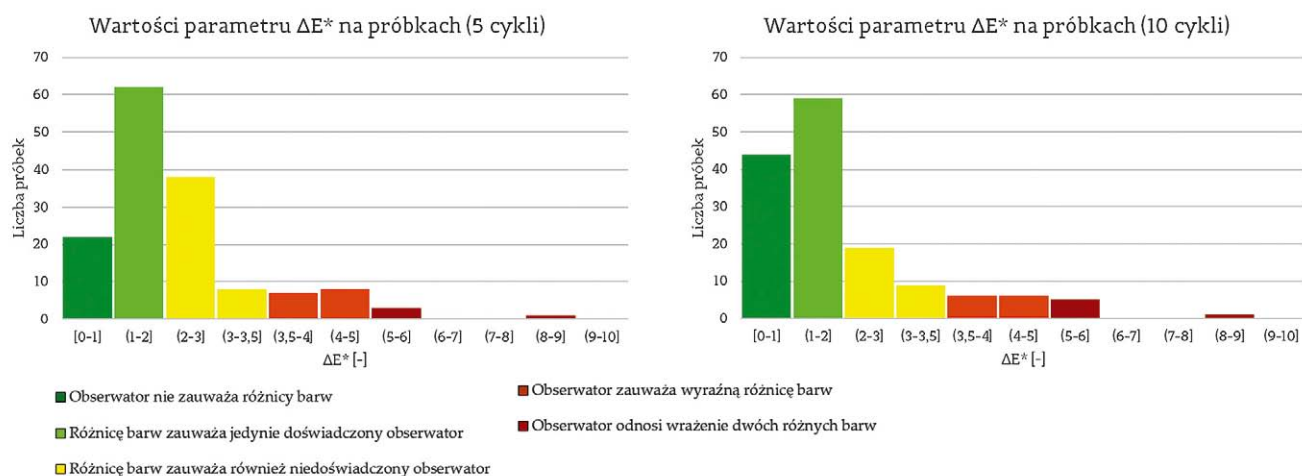


**Rys. 7.** Schemat blokowy skryptu do automatycznej analizy obrazu

Opracowany algorytm umożliwia automatyczną analizę obrazów zeskanowanych powierzchni próbek. W pierwszym etapie obraz poddawany jest konwersji do skali szarości, następnie wykonywane jest wyrównanie histogramu oraz filtracja z zastosowaniem rozmycia gaussowskiego. W kolejnym kroku przetworzony obraz poddawany jest binaryzacji, w wyniku której każdy piksel przyjmuje wartość czarną lub białą. W analizie zastosowano stały próg binaryzacji wynoszący 170, jednakowy dla wszystkich próbek. Następnie program dokonuje zliczenia pikseli czarnych i białych, a uzyskane wartości przelicza na ich udział procentowy w całkowitej liczbie pikseli obrazu. Dzięki temu możliwe jest określenie powierzchni próbki, na której wystąpiła istotna zmiana barwy. Wyniki analizy są automatycznie zestawiane w arkuszu Excel, a także prezentowane w formie zestawień graficznych. Obejmują one obrazy próbek z trzech etapów badania: skan, obraz w skali szarości po filtracji gaussowskiej, obraz zbinaryzowany oraz histogram przedstawiający rozkład liczby pikseli o określonych wartościach w skali szarości.

## 11. Badanie barwy próbek

Wyniki różnic barwy próbek betonowych po 5 oraz 10 cyklach procedury przyspieszonego starzenia przedstawiono na rysunku 8. Na podstawie współrzędnych barwy początkowej i końcowej obliczono parametr  $\Delta E_{ab}^*$  zgodnie ze wzorem (1). Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że dla zdecydowanej większości próbek, zarówno po 5, jak i po 10 cyklach starzenia, wartości  $\Delta E_{ab}^*$  mieszczą się w przedziałach 0–1 oraz 1–2, co odpowiada różnicom barwy niewielkim, trudnym do percepcji przez przeciętnego obserwatora lub dostrzegalnym jedynie w warunkach obserwacji przez osoby doświadczone. W przypadku próbek poddanych 10 cyklom starzenia odnotowano wzrost liczby wyników w najniższym przedziale  $\Delta E_{ab}^*$  (0–1) oraz jednocześnie



Rys. 8. Różnica barwy ΔE\*<sub>ab</sub> na próbkach betonu barwionego po 5 i 10 cyklach przyspieszonego starzenia

obniżenie udziału próbek w zakresie 2–3 w porównaniu z wynikami uzyskanymi po 5 cyklach starzenia.

Wysoki współczynnik zmienności parametrów a i b obserwowany dla próbek o ciemnej barwie (antracytowej) wynika z ograniczonej przydatności tych składowych w opisie barw zbliżonych do achromatycznych w przestrzeni CIELAB. W przypadku kolorów czerni, bieli oraz ich mieszanin dominującym parametrem opisowym jest jasność L\*, natomiast wartości a\* i b\* mają charakter zbliżony do zerowego i nie wnoszą istotnej informacji o barwie. Mimo że parametry a\* i b\* są formalnie rejestrowane podczas pomiarów spektrofotometrycznych, ich wartości dla barw ciemnych oscylują w pobliżu zera, co prowadzi do częstych zmian znaku (przejścia z wartości ujemnych na dodatnie i odwrotnie) pomiędzy kolejnymi pomiarami. W konsekwencji skutkuje to pozornie wysoką zmiennością względną tych parametrów. Przykładem jest próbka 258b, dla której współczynnik zmienności parametru b\* w poszczególnych terminach badań osiąga bardzo wysokie wartości, sięgające nawet 837% (tab. 2). W celu zwiększenia dokładności oceny barwy powierzchni betonowych wykonano pomiary w szesnastu losowo wybranych punktach każdej próbki. Uśrednienie uzyskanych wyników pozwoliło na wyznaczenie reprezentatywnej barwy, która wykazywała zmienność w kolejnych etapach przyspieszonego starzenia, przed starzeniem oraz po 5 i 10 cyklach procesu. Zauważono również przypadki, w których wartość parametru po 10 cyklach starzenia była niższa niż po 5 cyklach. Zjawisko to należy wiązać z losowym charakterem lokalizacji pomiarów na powierzchni próbki. W przypadku punktowego charakteru analizy możliwe jest uzyskanie wyników niemiernodajnych, gdy

większość pomiarów zostanie wykonana poza obszarami występowania zmian powierzchniowych, takich jak wykwit czy przebarwienia. Stanowi to jedną z istotnych ograniczeń metody spektrofotometrycznej w ocenie niejednorodnych powierzchni betonowych. Z drugiej strony, nadreprezentacja obszarów zmienionych lokalnie może prowadzić do zawyżenia wartości ΔE\*<sub>ab</sub>, jeżeli pomiary w większym stopniu obejmują strefy o zmienionej barwie.

## 12. Automatyczna analiza obrazu – algorytm

Wyniki analiz zostały wygenerowane automatycznie przy użyciu autorskiego skryptu do przetwarzania obrazów. Program opracowywał dane na podstawie zeskanowanych powierzchni próbek betonowych, tworząc zarówno zestawienia graficzne ilustrujące zmiany barwy, jak i zbiorcze tabele zawierające liczbę pikseli białych i czarnych oraz obliczone wartości zmian powierzchniowych wyrażone w procentach. Przykładowe zestawienie dla próbki 175a, wykonane w trzech terminach badań, przedstawiono na rysunku 9 (górny rząd obrazów). W kolejnym wierszu zaprezentowano obrazy w skali szarości uzyskane w wyniku przetwarzania cyfrowego. Na tym etapie algorytm stosuje filtr rozmycia gaussowskiego, a następnie identyfikuje skupiska pikseli o zbliżonych wartościach jasności. W następnym etapie przedstawiono obrazy zbinaryzowane (rys. 11), uzyskane przy zastosowaniu stałego progu binaryzacji. Obszary oznaczone kolorem białym odpowiadają strefom zmian powierzchniowych, natomiast obszary czarne reprezentują fragmenty niezmienione. Uzupełnieniem zestawienia są histogramy

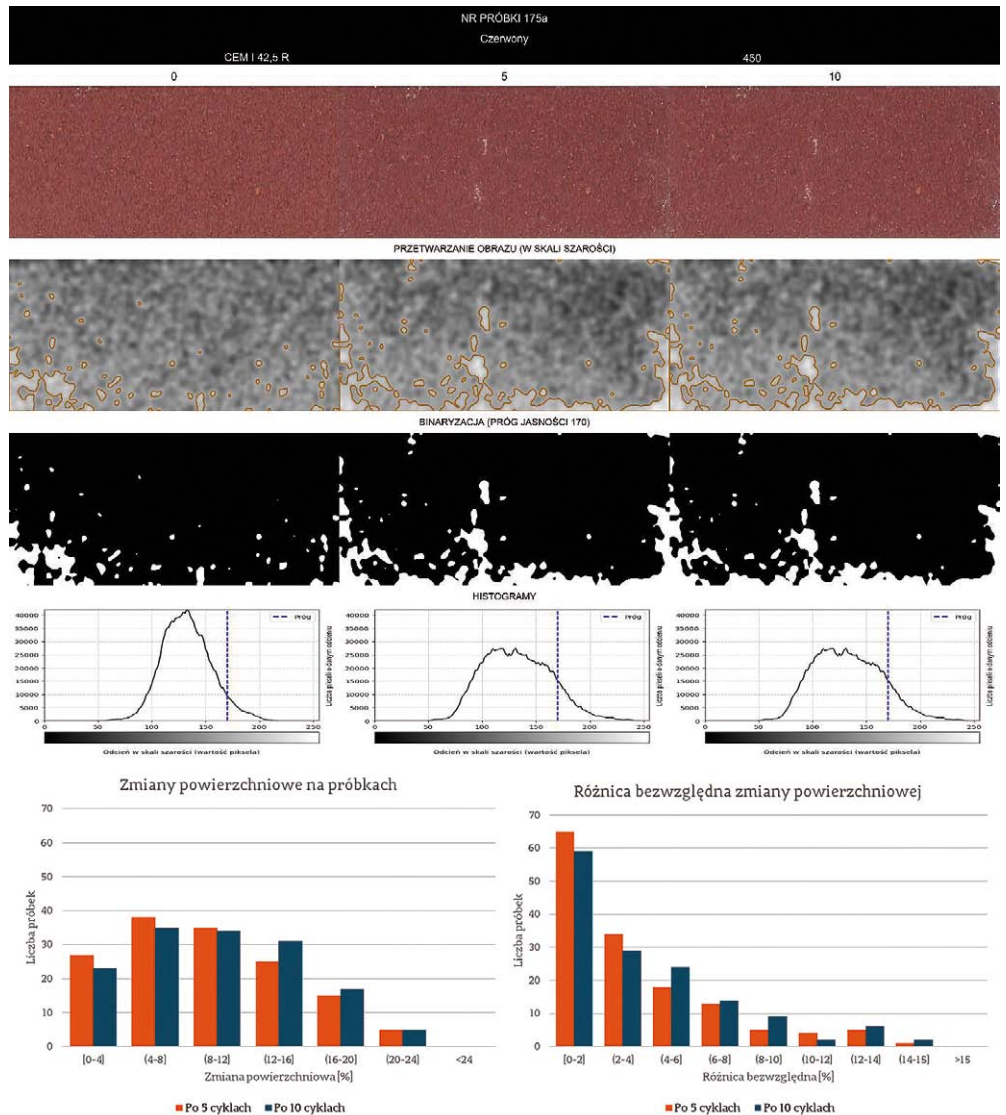
Tabela 2. Wyniki badania barwy próbki 258b za pomocą spektrofotometru

| NR PRÓBKII | 258b    |          |          |         |          |        |            |         |          |         |            |
|------------|---------|----------|----------|---------|----------|--------|------------|---------|----------|---------|------------|
|            | 0       |          |          | 5       |          |        |            | 10      |          |         |            |
| CYKL       | ŚREDNIA | ODCH. ST | WSP ZM   | ŚREDNIA | ODCH. ST | WSP ZM | Zmiana [%] | ŚREDNIA | ODCH. ST | WSP ZM  | Zmiana [%] |
| L*         | 23,400  | 0,389    | 1,662    | 21,941  | 0,605    | 2,758  | -6,234     | 25,394  | 1,546    | 6,087   | 8,523      |
| a*         | 0,396   | 1,236    | 312,570  | 0,336   | 0,031    | 9,160  | -15,155    | 0,258   | 0,075    | 29,243  | -34,893    |
| b*         | -0,092  | 0,768    | -836,952 | 0,660   | 0,096    | 14,611 | -818,856   | 0,053   | 0,208    | 389,135 | 158,135    |
| ΔE*        |         |          |          |         |          |        | 1,642      | 2,004   |          |         |            |

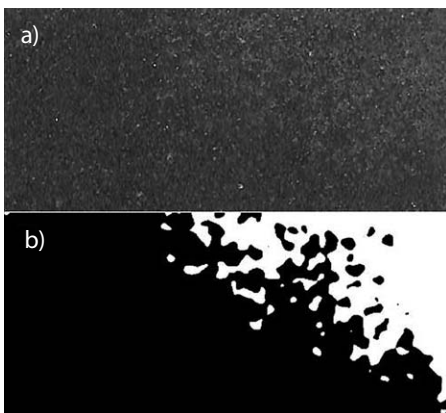
**Rys. 9.** Zestawienie stworzone za pomocą skryptu do automatycznej analizy obrazu

dla każdego obrazu, przedstawiające rozkład liczby pikseli odpowiadających poszczególnym wartościom skali szarości. Algorytm umożliwia wyznaczenie procentowego udziału obszaru białego względem całkowitej powierzchni próbki. Rozkład liczby próbek w poszczególnych przedziałach procentowych zmian powierzchniowych przedstawiono na rysunku 10. Uzyskane wyniki wskazują, że zmiany powierzchniowe na badanych próbkach zazwyczaj nie przekraczają 24% powierzchni. Zarówno po 5, jak i po 10 cyklach starzenia, największa liczba próbek klasyfikuje się w trzech najniższych przedziałach, tj. w zakresie 0–12%. Zastosowana metoda umożliwiła ilościową charakterystykę wszystkich analizowanych powierzchni, co pozwoliło na identyfikację próbek wykazujących największy stopień zmian powierzchniowych. Największe wartości odnoto-

wano dla próbek w kolorze antracytowym zawierających 350 kg/m<sup>3</sup> cementu. Maksymalny udział obszaru objętego zmianami powierzchniowymi wyniósł 23,12% powierzchni badanej próbki. Ze względu na to, że każda próbka była analizowana w trzech



**Rys. 10.** Zmiany powierzchniowe oraz różnice bezwzględne procentowej zmiany powierzchni wykwitu na próbkach



**Rys. 11.** Próбка nr 269b: a) skan powierzchni próbki po 10 cyklach przyspieszonego starzenia, b) binaryzacja skanu

różnych terminach, wyznaczono również przyrosty zmian powierzchniowych. Rozkład różnic bezwzględnych pomiędzy udziałem powierzchni objętej zmianami po oraz w trakcie procedury przyspieszonego starzenia, a stanem początkowym przed rozpoczęciem cyklu badań przedstawiono na rysunku 10. Uzyskane wartości różnic bezwzględnych w większości przypadków mieszczą się w zakresie 0–6%, zarówno po 5, jak i po 10 cyklach starzenia próbek betonu barwionego. Zastosowana procedura przyspieszonego starzenia doprowadziła do zwiększenia udziału powierzchni objętej wykwitami, co potwierdza skuteczność przyjętej metodyki oceny zmian powierzchniowych betonu barwionego. Po 10 cyklach starzenia zaobserwowano zmniejszenie liczby próbek w trzech najniższych przedziałach procentowych w porównaniu z wynikami uzyskanymi po 5 cyklach (rys. 11). Analogiczną tendencję odnotowano w przypadku różnic bezwzględnych zmian powierzchniowych – w dwóch najniższych przedziałach procentowych zauważalny jest spadek liczby próbek, dla których przyrost powierzchni objętej zmianami był mniejszy po większej liczbie cykli starzenia.

### 13. Podsumowanie

Zestawione wyniki uzyskane z pomiarów barwy spektrofotometrem oraz analizy obrazu poddano korelacji w celu oceny zależności pomiędzy badanymi cechami. Analiza relacji pomiędzy różnicą bezwzględną udziału powierzchni objętej zmianami a parametrem, przedstawiona na rysunku 12, nie wykazała istnienia istotnej zależności korelacyjnej. Uzyskany rezultat potwierdza założenia przyjęte w opracowanej metodyce opartej na analizie obrazu. Pomiar spektrofotometryczny opisuje uśrednioną zmianę barwy całej powierzchni próbki betonu barwionego, natomiast opracowany algorytm umożliwia lokalizację i ilościową ocenę obszarów rzeczywistych zmian powierzchniowych.

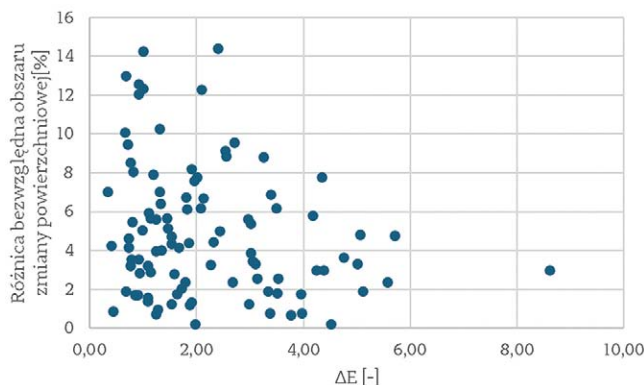
Badania spektrofotometryczne oraz analiza obrazu odnoszą się do odmiennych właściwości powierzchni i w związku z tym nie powinny być stosowane zamiennie. Potencjał powstawania wykwitów może być wiarygodnie rejestrowany jedynie przy wykorzystaniu metod umożliwiających analizę całej powierzchni próbki, takich jak zaproponowany algorytm przetwarzania obrazu. W przeciwieństwie do tego badania punktowe wykonywane spektrofotometrem nie pozwalają na ocenę zasięgu oraz przestrzennego rozkładu wykwitów na powierzchni betonu.

Wartość średniej barwy próbki zależy w dużej mierze od lokalizacji punktów pomiarowych, co oznacza, że losowy dobór miejsc pomiaru może prowadzić do uzyskania jedynie uśrednionego opisu koloru, obciążonego zmiennością wynikającą z niejednorodności powierzchni. W konsekwencji współczynniki zmienności parametrów barwy są silnie uzależnione od jednorodności kolorystycznej badanej próbki.

Zaproponowaną metodykę można wykorzystać również do innych analiz materiałowych. W przeprowadzonych badaniach wykazano m.in., że zastosowanie cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/A-M (S-LL) 52,5 N w przyjętym zakresie zmienności wiązało się z najmniejszą tendencją do wzrostu powierzchni wykwitów wraz ze zwiększaniem zawartości spoiwa w mieszance. Z kolei próbki wykonane z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R wykazywały największą skłonność do intensyfikacji powstawania wykwitów przy wzroście ilości spoiwa w mieszance betonowej (wyniki te stanowią jedynie część szerszej analizy dotyczącej wpływu cementu i pigmentów na powstawanie wykwitów, wykraczającej poza zakres niniejszego opracowania).

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wyników sformułowano następujące wnioski:

- opracowany skrypt do automatycznej analizy obrazu stanowi użyteczne narzędzie do ilościowego określania udziału powierzchni objętej wykwitami,
- zastosowanie analizy obrazu do oceny wykwitów na powierzchni barwionego betonu architektonicznego umożliwia uzyskanie miarodajnych, ilościowych wyników,
- intensywność powstawania wykwitów na powierzchni betonu barwionego jest zależna od czasu ekspozycji na zmienne



**Rys. 12.** Wykres braku zależności różnicy bezwzględnej obszaru zmiany powierzchniowej od parametru  $\Delta E^*$

warunki wilgotnościowe, stężenia  $\text{CO}_2$  oraz temperatury, które w niniejszej pracy symulowano w warunkach przyspieszonego starzenia.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Jackiewicz-Rek W., Kształtowanie jakości gładkiego betonu architektonicznego, *Materiały Budowlane* 9/2015
- [2] Jackiewicz-Rek W., Mroczek M., Fotobeton jako sposób urozmaicenia formy architektonicznej budowli, *Materiały Budowlane* 12/2014
- [3] Jackiewicz-Rek W., Woyciechowski P. P., Wady betonu architektonicznego w konstrukcji, *Materiały Budowlane* 2/2014
- [4] Jackiewicz-Rek W., Kuniczuk K., Ocena jakości betonu architektonicznego w konstrukcji, *Inżynier Budownictwa* 11/2013
- [5] Łukowski P., Modyfikacja materiałowa betonu, *Stowarzyszenie Producentów Cementu*, 2016
- [6] Sulcova P., Options synthesis and application testing of inorganic pigments, *Proceedings of 7th conference on international participation of particular substances in science, industry and environment*, Technical University of Kosice, Kosice, 2012
- [7] Hospodarova V., Junak J., Stevulova N., Color pigments in concrete and their properties, *Pollack Periodica* 10, 3/2015, str. 143–151
- [8] Kurpiński K., Barwienie betonu – Praktyczne wskazówki cz. 1, 2019
- [9] Lee H., Lee J., Yu M., Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks, *Cement and Concrete Research* 33, 11/2003, str. 1889–1896
- [10] Corinaldesi V., Monosi S., Ruello L. M., Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC, *Construction and Building Materials* 30, 2012, str. 289–293
- [11] Szymczak E., Oleksik M., Barwienie betonu-techniczne aspekty stosowania pigmentów, *Budownictwo, Technologie, Architektura* 2/2018, str. 58–61
- [12] Kurdowski W., Garbacz A., Wykity na betonie, *Budownictwo Technologie Architektura*, numer specjalny, 2005
- [N1] PN-EN 12878:2014-05: Pigmenty do barwienia materiałów budowlanych opartych na cemencie i/lub wapnie – Wymagania i metody badań
- [N2] PN-EN 1338:2005: Betonowe kostki brukowe – Wymagania i metody badań
- [N3] PN-EN 1339:2005 Betonowe płyty brukowe – Wymagania i metody badań
- [N4] PN-EN 1340:2004 Krawężniki betonowe – Wymagania i metody badań
- [N5] PN-EN 197-1: Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [N6] PN-EN 13139:2003: Kruszywa do zaprawy
- [N7] PN-EN 1008:2004: Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu
- [N8] PN-EN 934-2: Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje i wymagania

# Badania doświadczalne zarysowania płyt na podłożu sprężystym poddanych lokalnemu obciążeniu

Experimental tests on cracking of plates on an elastic foundation subject to local loading

mgr inż. Rafał Roszczenko, mgr inż. Adrian Saczko, inż. Monika Urbaniak, inż. Kornelia Bińczyk, mgr inż. Patrycja Szczęsna, Koło Naukowe Żelbetnik, absolwenci PW, dr inż. Maria Włodarczyk (ORCID: 0000-0002-9094-3410), dr hab. inż. Marcin Gajewski, prof. PW (ORCID: 0000-0002-3171-8504), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7439

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono badania doświadczalne 32 cienkich płyt betonowych spoczywających na podłożu sprężystym i poddanych lokalnemu obciążeniu. Badania miały na celu określenie siły rysującej oraz charakteru rozwoju zarysowania w zależności od rodzaju zbrojenia. Badaniom poddano cztery rodzaje płyt: PFS – fibrobeton ze stalowymi włóknami 4D-80/60BG (25 kg/m<sup>3</sup>), PFP – fibrobeton z włóknami polimerowymi (1,64 kg/m<sup>3</sup>), PS – płyty zbrojone prętami stalowymi Ø8 oraz PB – płyty betonowe referencyjne bez zbrojenia. Wszystkie płyty wykonano z betonu o klasie wytrzymałości zbliżonej do C70/85. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej, rejestrując zależność siła-przemieszczenie, moment inicjacji spękania i charakter rozwoju rysy/układu rys. Stwierdzono, że zbrojenie prętami stalowymi zapewnia największą nośność na zarysowanie i najmniejsze odkształcenia. Zbrojenie rozproszone stalowe daje zbliżone wyniki do prętowego, natomiast włókna polimerowe i beton zwykły wykazują wyraźnie niższą odporność na lokalne obciążenie. Obserwowano istotne różnice w obrazie zarysowania. Wyniki wskazują na wysoką efektywność fibrobetonu z włóknami stalowymi jako alternatywy dla tradycyjnego zbrojenia prętowego w cienkościennych elementach poddanych siłom skupionym. Badania stanowią wstęp do dalszych analiz optymalizacji zawartości i rodzaju włókien oraz mogą stanowić bazę do walidacji modeli obliczeniowych o charakterze analitycznym jak i numerycznym.

**Słowa kluczowe:** fibrobeton, włókna stalowe i polimerowe, płyty cienkie, zarysowanie, sprężyste podłoże.

**Abstract:** The paper presents the experimental tests on 32 thin concrete plates resting on an elastic foundation and subjected to local concentrated loading. The aim of the study was to determine the cracking force and the character of crack development depending on the type of reinforcement. Four types of plates were tested: PFS – steel fibre reinforced concrete with 4D-80/60BG steel fibres (25 kg/m<sup>3</sup>), PFP – polymer fibre reinforced concrete (1,64 kg/m<sup>3</sup>), PS – plates reinforced with Ø8 steel bars, and PB – plain concrete reference plates without reinforcement. All plates were made of concrete with a strength class close to C70/85. The tests were carried out on a universal testing machine, recording the load-displacement relationship, the moment of crack initiation, and the character of crack development and cracking pattern. It was found that reinforcement with steel bars provides the highest cracking resistance and the smallest strains. Distributed steel fibre reinforcement yields results very close to those of bar reinforcement, whereas polymer fibres and plain concrete exhibit significantly lower resistance to local loading. Significant differences in the cracking pattern were observed. The results indicate the high effectiveness of steel fibre reinforced concrete as an alternative to conventional bar reinforcement in thin-walled elements subjected to concentrated loads. The study constitutes a preliminary investigation for further analyses of the optimisation of fibre content and type and may serve as a basis for the validation of both analytical and numerical computational models.

**Keywords:** fibre-reinforced concrete, steel and polymer fibres, thin plates, cracking, elastic foundation.

## 1. Wprowadzenie

Konstrukcje betonowe w budownictwie są stosowane powszechnie. W związku z tym w ramach inżynierii materiałowej nieustannie prowadzone są badania doświadczalne kompozytów, aby zaprojektować jak najbardziej efektywną mieszankę betonową. Obecnie wykonywane obiekty budowlane projektowane są na coraz większe obciążenia przy jednoczesnych staraniach oszczędności na materiałach oraz ograniczaniu ingerencji w środowisko naturalne. Rosnące wymagania stawiane

konstrukcjom budowlanym zaczynają przekraczać granice fizyczne klasycznego betonu niemodyfikowanego [1]. Wraz z rozwojem inżynierii materiałowej pojawiły się betony ze zbrojeniem rozproszonym. Po raz pierwszy na dodanie włókien stalowych do mieszanki betonowej zdecydowali się Romualdi oraz Mandel w 1962 r. [2] stwierdzając, że zmiana ta wpłynęła na charakter zachowania się betonu z kruchego na quasiplastyczny. Jest to korzystne, ponieważ pojawienie się pierwszej rysy nie powoduje kruchego zniszczenia, a konstrukcja może dalej przenosić obciążenia.

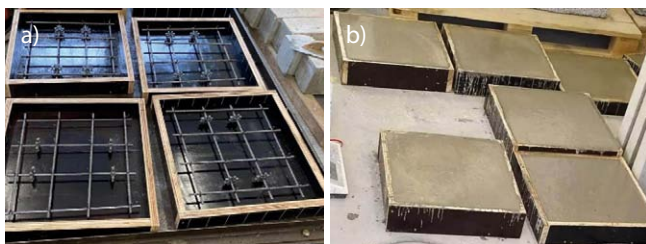
W 1973 r. opatentowano fibrobeton [2] i od tego czasu jest on jednym z najbardziej dynamicznie rozwijającym się materiałów, zastępując beton zbrojony prętami stalowymi. Opracowano wiele kompozytów w różnorodnych wariantach, począwszy od rodzaju, kształtu włókien i zawartości w mieszance betonowej, po optymalizowanie współgrających ze sobą właściwości betonu i rozproszonego zbrojenia. Obecnie kierunek rozwoju wskazuje wyraźnie na innowacyjne włókna syntetyczne, bazaltowe czy węglowe o wydajności zbliżonej lub wyższej od włókien stalowych, a przede wszystkim mniej wpływające niekorzystnie na środowisko [3–20].

Procesy niekorzystnego oddziaływania środowiska na konstrukcje żelbetowe wpływają na ich bezpieczeństwo i niezawodność oraz obniżają ich trwałość. W zależności od rodzaju konstrukcji oraz warunków eksploatacji występuje bezpośrednio i pośrednio zagrożenie korozyjne [21]. Zapewnienie odpowiedniej trwałości obiektom budowlanym, jak również ograniczenie wpływu niekorzystnego oddziaływania na środowisko (między innymi ślad  $\text{CO}_2$ ) stanowi dość istotny problem techniczny [21, 22]. W związku z tym coraz częściej sytuacje obliczeniowe wymagają od projektantów stosowania alternatywnego rozwiązania zarówno przy wznoszeniu nowych obiektów budowlanych, jak i napraw obiektów już istniejących. Jednym z takich rozwiązań jest zastosowanie fibrobetonów, z tym że obecnie coraz częściej stalowe zbrojenie rozproszone zastępuje się włóknami bazaltowymi, węglowymi, szklanymi czy polimerowymi [18, 23, 24]. W artykule omówiono badania płyt zginanych posadowionych na podłożu sprężystym wykonanych z fibrobetonu z zastosowaniem włókien polimerowych i stalowych oraz płyt referencyjnych ze zbrojeniem prętami stalowymi i betonowych bez zbrojenia. Badania te miały na celu ustalenie wartości siły, przy której następuje ich zarysowanie.

## 2. Opis badań doświadczalnych

### 2.1. Przygotowanie płyt do badań

Badania doświadczalne zostały przeprowadzone na czterech seriach 32 cienkich płyt betonowych. Seria pierwsza (S1) obejmowała płyty z rozproszonym zbrojeniem stalowym (PFS), seria druga (S2) – z rozproszonym zbrojeniem polimerowym (PFP), seria trzecia (S3) – płyty zbrojone prętami stalowymi (PS) a czwarta (S4) – płyty betonowe (PB). W skład jednej serii wchodziły po 4 płyty o wymiarach 390x390x60 mm i 390x390x40 mm. Na zdjęciach (rys. 1) pokazano wybrane elementy przygotowywane



**Rys. 1.** Elementy badawcze: a) zbrojenie płyt; b) płyty po zabetonowaniu (zdjęcia własne)

do badań. Natomiast ilościowy skład mieszanki betonowej, z której zostały wykonane płyty podano w tabeli 1.

**Tabela 1.** Ilościowy skład mieszanki betonowej

| Składniki          | Skład mieszanki [kg/m <sup>3</sup> ] |
|--------------------|--------------------------------------|
| Cement             | 410                                  |
| Piasek 0/2 mm      | 650                                  |
| Granit 2/8 mm      | 748                                  |
| Granit 8/16 mm     | 410                                  |
| Woda               | 163                                  |
| Superplastyfikator | 4,1                                  |

Do wykonania płyt serii 1 zastosowano 25 kg/m<sup>3</sup> zbrojenia rozproszonego stalowego (Steel Fibers 4D-80/60BG), płyt serii 2 – 1,64 kg/m<sup>3</sup> polimerowego, płyt serii 3 pręty średnicy 8 mm o  $f_{yk} = 500$  MPa, a płyty serii 4 wykonano z betonu bez zbrojenia.

### 2.2. Właściwości charakterystyczne materiałów

W celu określenia i wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano próbki sześciennie o boku 150 mm i modułu sprężystości, walcowe o średnicy podstawy 150 mm oraz wysokości 300 mm. Uzyskane wyniki badań materiałowych zestawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Właściwości mechaniczne zastosowanych materiałów

| Seria         |                  | $f_{ck}$ [MPa] | $f_{ctm}$ [MPa] | $E_{cm}$ [GPa] |
|---------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|
| Seria 1 (PFS) | PFS1             | 83,30          | 4,91            | 42,71          |
|               | PFS2             | 73,68          | 4,70            | 41,31          |
|               | PFS3             | 70,81          | 4,63            | 40,87          |
|               | Wartości średnie | 75,93          | 4,74            | 41,66          |
| Seria 2 (PFP) | PFP1             | 69,52          | 4,60            | 40,66          |
|               | PFP2             | 59,65          | 4,34            | 39,04          |
|               | PFP3             | 60,00          | 4,35            | 39,10          |
|               | Wartości średnie | 63,06          | 4,43            | 39,60          |
| Seria 3 (PS)  | PS1              | 74,61          | 4,71            | 41,40          |
|               | PS2              | 77,73          | 4,80            | 41,91          |
|               | PS3              | 74,28          | 4,71            | 41,40          |
|               | Wartości średnie | 75,54          | 4,74            | 41,57          |
| Seria 4 (PB)  | PB1              | 69,79          | 4,81            | 42,80          |
|               | PB2              | 74,88          | 3,42            | 40,26          |
|               | PB3              | 64,45          | 4,77            | 41,78          |
|               | Wartości średnie | 69,71          | 4,33            | 41,62          |

### 2.3. Stanowisko badawcze

Badane płyty zniszczono przy wykorzystaniu elektromechanicznej maszyny wytrzymałościowej INSTRON o zakresie siły do 100 kN. Podczas badań główny nacisk kładziono na określenie powstania pierwszych rys i oszacowanie wielkości siły rysującej. W celu określenia zachowania się cienkich elementów w zależności od serii badawczej pod działaniem obciążenia lokalnego wykonano badania lokalnego docisku w centralnym punkcie płyty (średnica sztywnej przekładki dociskowej wynosi 100 mm) spoczywającej na podłożu sprężystym. Stanowisko badawcze pokazano na rysunkach 2. Podłoże sprężyste stanowi płyta poliuretanowa (rys. 2b) o grubości 80 mm i właściwościach zamieszczonych w tabeli 3.



Rys. 2. Stanowisko badawcze: a) widok, b) podkładka poliuretanowa (zdjęcia własne)

Tabela 3. Właściwości wkładki poliuretanowej

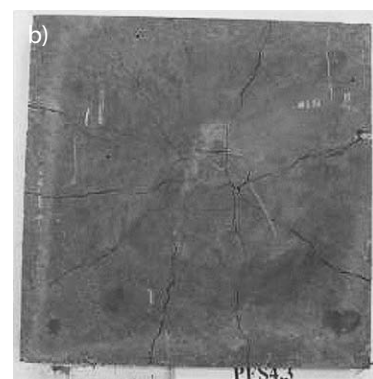
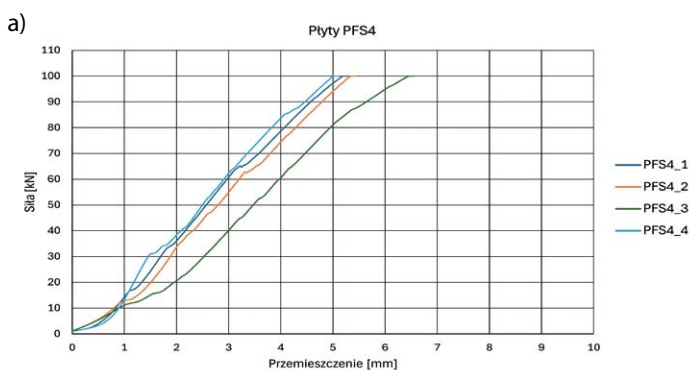
| Właściwość                              | Norma    | Wartość                   |
|---|----------|---------------------------|
| Twardość w 20° C                        | DIN53505 | Shore A 95                |
| Moduł sprężystości przy wydłużeniu 100% | DIN53504 | 12,4 [MPa]                |
| Moduł sprężystości przy wydłużeniu 300% | DIN53504 | 23,4 [MPa]                |
| Wytrzymałość na rozciąganie             | DIN53504 | 34,5 [MPa]                |
| Wydłużenie przy zerwaniu                | DIN53504 | 400%                      |
| Gęstość                                 | –        | 1140 [kg/m <sup>3</sup> ] |

### 3. Wyniki i analiza badań doświadczalnych

Przyjęto następujące oznaczenia elementów: PFSG.i – płyta z rozproszonym zbrojeniem stalowym, PFPG.i – z rozproszonym zbrojeniem polimerowym, PSG.i – ze zbrojeniem stalowym  $\varnothing 8$ , PBG.i – płyta betonowa, gdzie G oznacza grubość płyty ( $G = 4$  dla płyt o grubości 40 mm, a 6 dla płyt o grubości 60 mm), „i” oznacza numer kolejnej płyty w danej serii ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), np. PB4.1 – płyta betonowa o grubości 40 mm.

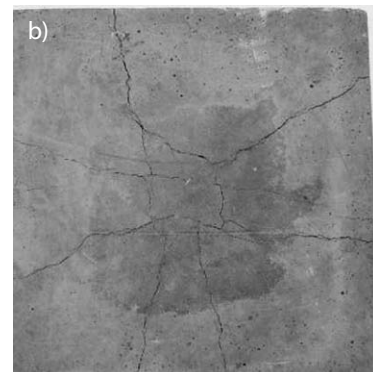
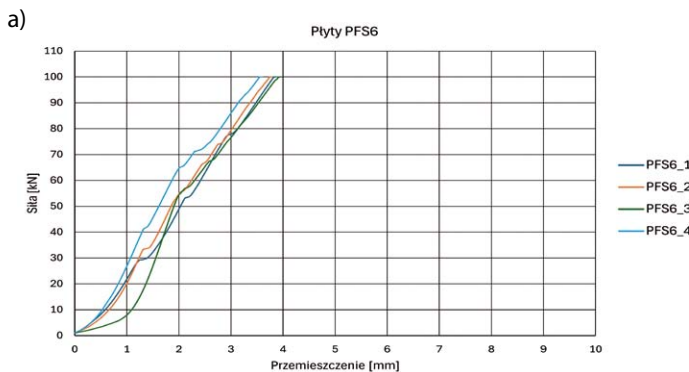
Rys. 3. Płyty PFS4:

a) wykres siła-przemieszczenie, b) widok rys płyty PFS4.3 (zdjęcie własne)



Rys. 4. Płyty PFS6:

a) wykres siła-przemieszczenie, b) widok rys płyty PFS6.3 (zdjęcie własne)



#### 3.1. Elementy badawcze ze stalowym zbrojeniem rozproszonym PFS

Na wykresie (rys. 3a) przedstawiono przyrost przemieszczenia płyt PFS4 o grubości 40 mm ze stalowym zbrojeniem rozproszonym w zależności od siły, a na rysunku 3b na przykładzie płyty PFS4.3 pokazano obraz zarysowania. Natomiast na rysunku 4 są pokazane wykresy przemieszczenia i obraz zarysowania płyty o grubości 60 mm.

W płytach PFS o grubości 40 mm pierwsze zarysowanie nastąpiło przy średniej sile 22,25 kN i przemieszczeniu 1,3 mm (rys. 3a), a w płytach o grubości 60 mm przy sile 39,5 kN i przemieszczeniu 1,4 mm (rys. 4a). W tych płytach rysy układają się nieregularnie w różnych kierunkach. Charakter rys jest zbliżony do układu trajektorii elementów wielokierunkowo zbrojonych. Głębokość rysy obejmuje ok. 65% grubości płyty. W miejscu przyłożenia obciążenia widoczny jest zarysowujący się efekt przebiccia, co nie jest korzystnym zjawiskiem w płytach. W momencie zniszczenia nie doszło do przebiccia płyt.

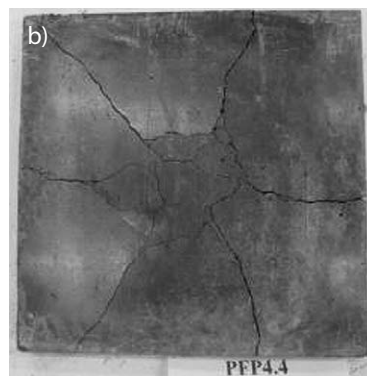
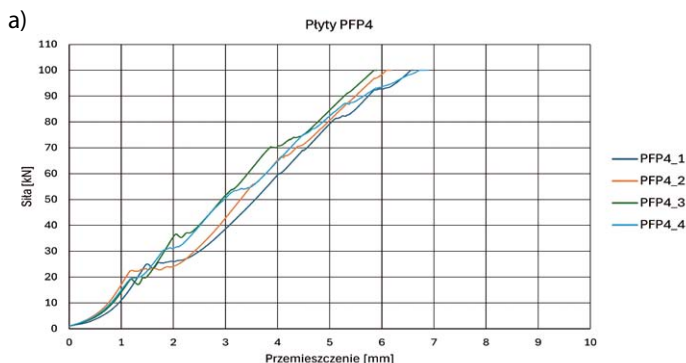
#### 3.2. Elementy badawcze z polimerowym zbrojeniem rozproszonym PFP

Wykresy zależności siła-przemieszczenie płyt PFP4 pokazano na rysunku 5a, a płyt PFP6 na rysunku 6a. Natomiast obrazy zarysowania zostały pokazane na rysunkach 5b i 6b.

W płytach PFP4 z włóknami polimerowymi pierwsze rysy następowały przy średniej sile 21,75 kN i przemieszczeniu 1,3 mm (rys. 5a) a w płytach PFP przy sile 29,75 kN i przemieszczeniu 1,5 mm (rys. 6a). Zarówno w płytach grubości 40, jak i 60 mm rysy układają się nieregularnie w różnych kierunkach. Obraz zarysowania charakteryzuje się małą ilością średniej szerokości

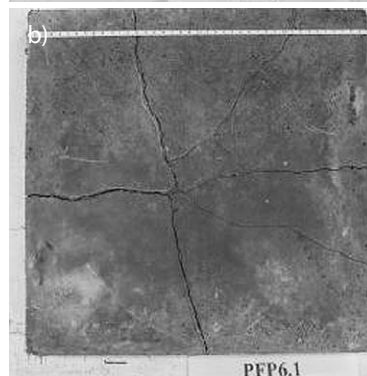
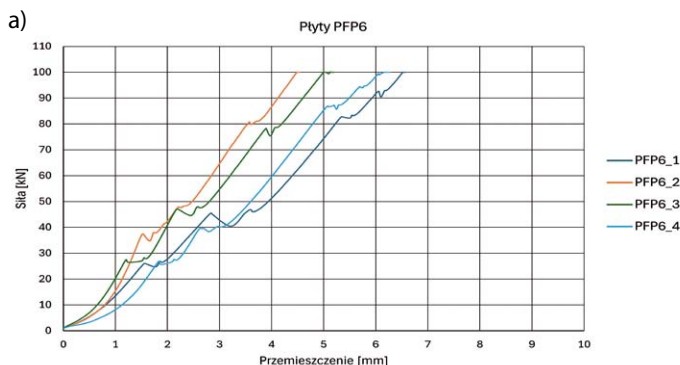
**Rys. 5. Płyty PFP4:**

a) wykres siła-przemieszczenie,  
b) widok rys płyty PFP4.4 (zdjęcie własne)



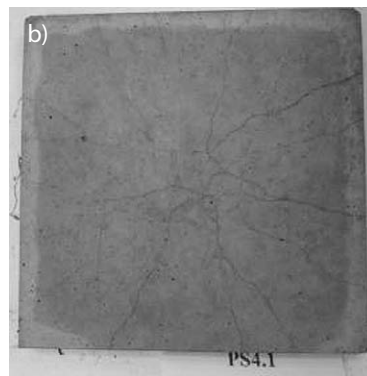
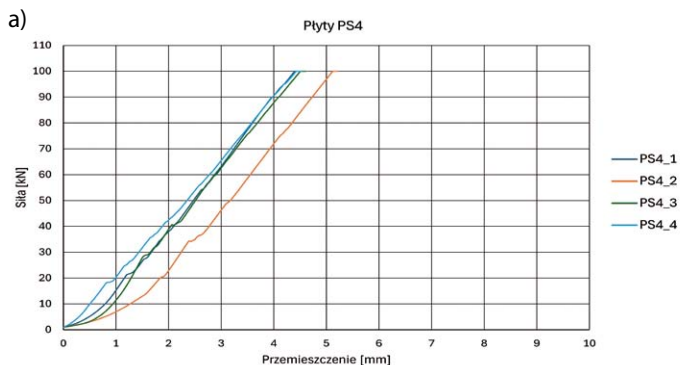
**Rys. 6. Płyty PFP6:**

a) wykres siła-przemieszczenie,  
b) widok rys płyty PFP6.1 (zdjęcie własne)



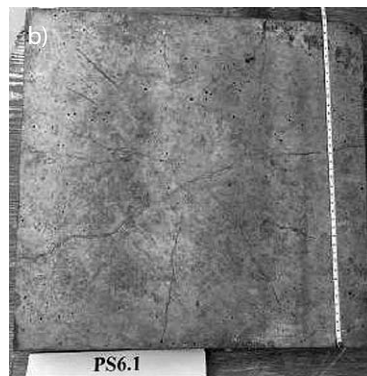
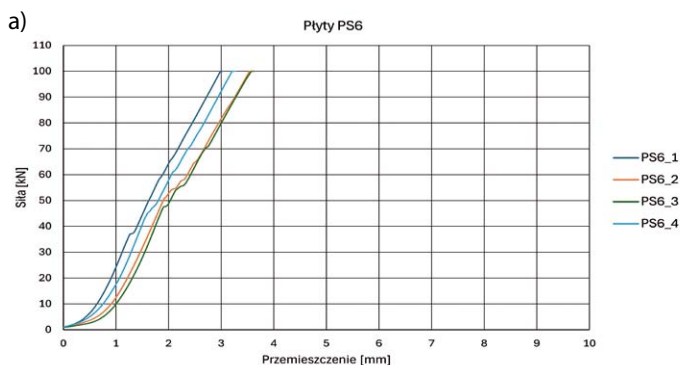
**Rys. 7. Płyty PS4:**

a) wykres siła-przemieszczenie,  
b) widok rys płyty PS4.1 (zdjęcie własne)



**Rys. 8. Płyty PS6:**

a) wykres siła-przemieszczenie,  
b) widok rys płyty PS6.1 (zdjęcie własne)



rys rozchodzących się promieniście od punktu przyłożenia siły. Głębokość rysy obejmuje ok. 70% grubości płyty.

**3.3. Elementy ze zbrojeniem stalowym PS**

Wykresy zależności siła-przemieszczenie w płytach PS4 pokazano na rysunku 7a, a w płytach PS6 na rysunku 8a. Natomiast obrazy zarysowania są pokazane na rysunkach 7b i 8b.

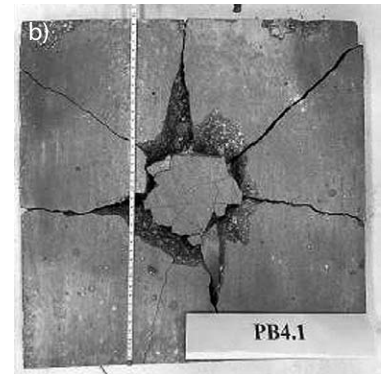
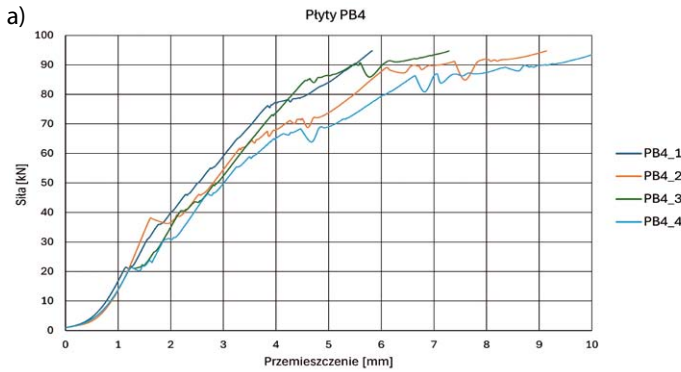
W przypadku płyt PS4 ze zbrojeniem prętami stalowymi pierwsze rysy następowały przy średniej sile 22,75 kN i przemieszczeniu

1,3 mm (rys. 7a), a płyt PS6 przy sile 44 kN oraz przemieszczeniu 1,5 mm (rys. 8a). W tych płytach zarówno dla grubości 40 mm i 60 mm zarysowanie charakteryzuje się dużą ilością drobnych rys rozchodzących się promieniście od punktu przyłożenia siły (rys. 7b i rys. 8b). Głębokość rysy obejmuje ok. 70% grubości płyty.

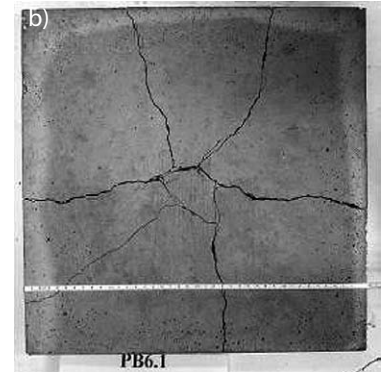
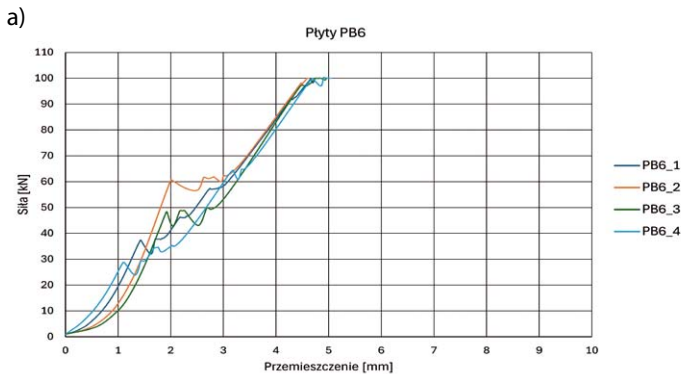
**3.4. Elementy betonowe PB**

Wykresy zależności siła-przemieszczenie płyt PB4 pokazano na rysunku 9a, natomiast na rysunku 9b obraz zarysowania,

**Rys. 9.** Płyty PB4:  
a) wykres siła-  
-przemieszczenie,  
b) widok rys płyty  
PB4.1 (zdjęcie  
własne)



**Rys. 10.** Płyty PB6:  
a) wykres siła-  
-przemieszczenie,  
b) widok rys płyty  
PB6.1 (zdjęcie  
własne)



a na rysunku 10 płyt grubości 60 mm (PB6). W płytach betonowych o grubości 40 mm pierwsze zarysowanie nastąpiło przy sile około 21 kN i przemieszczeniu 1 mm (rys. 9a). Charakter zarysowania płyty przedstawia zdjęcie (rys. 9b), na którym wyraźnie widać zniszczenie na przebicie i charakterystyczny w tym przypadku układ rys. W płytach powstała mała ilość rys o dużych szerokościach. Natomiast w płytach betonowych PB6 (rys. 10) pierwsze rysy powstały przy dość zróżnicowanej sile o średniej wartości 28,5 kN i przemieszczeniu 1,4 mm. Układ rys jest podobny jak w płytach PB4. Zarysowanie charakteryzuje się kilkoma rysami o dość dużej szerokości rozchodzącymi się promieniście od punktu przyłożenia siły. Głębokość rysy obejmuje ok. 90% grubości płyty.

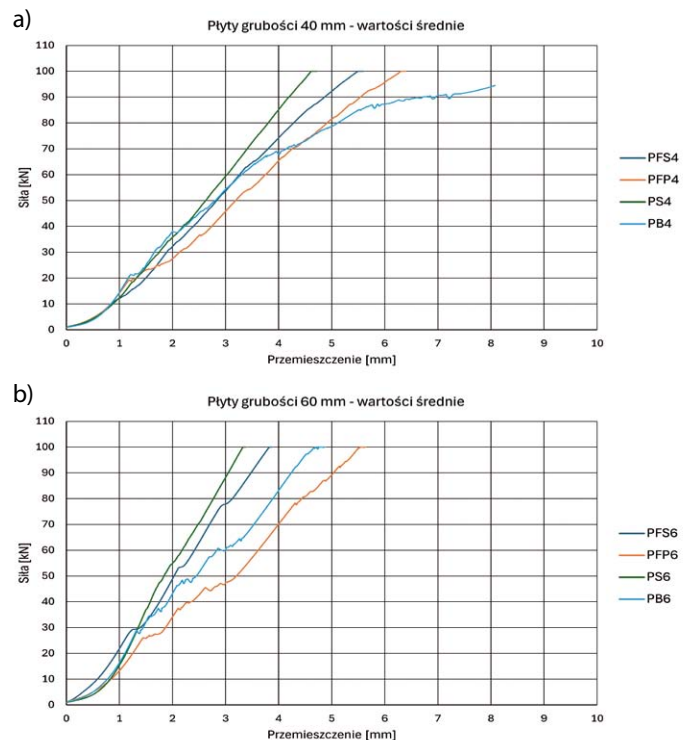
#### 4. Podsumowanie

Na podstawie wyników badań doświadczalnych wpływu lokalnego obciążenia na płytę cienką w zależności od sposobu zbrojenia możemy zauważyć zależności pomiędzy charakterem zarysowania, szerokością rys i rodzajem zastosowanego zbrojenia (włókna, pręty stalowe lub brak zbrojenia).

Zbiorcze wykresy średnich wartości przemieszczenia zginanych płytach o tej samej grubości, z różnym rodzajem zbrojenia lub bez zbrojenia, opartych na sprężystym podłożu pokazano na wykresach (rys. 11). Wykres na rysunku 11a odnosi się do płyt grubości 40 mm, a wykres na rysunku 12b do płyt grubości 60 mm.

Na podstawie wyników badań płyt grubości 40 mm przedstawionych na wykresie (rys. 11a) możemy zauważyć,

iż największą siłą rysującą ( $F = 22,75$  kN) przy przemieszczeniu  $a = 1,3$  mm i stosunkowo niewielkim zarysowaniu użytkują płyty z prętami stalowymi. W dalszej kolejności są płyty z dodatkiem włókien stalowych ( $F = 22,25$  kN) i polimerowych ( $F = 21,75$  kN). Najmniejsze obciążenie w stosunku do przyrostu odkształceń przeniosła płyta betonowa, dla której przyłożona



**Rys. 11.** Wykres siła-przemieszczenie: a) płyty PB4, PS4, PFP4, PFS4; b) płyty PB6, PS6, PFP6, PFS6

siła spowodowała zniszczenie na przebiecie. Porównując obraz zarysowania i wielkość siły i przemieszczeń, możemy wywnioskować, że na lokalne obciążenie odporne pozostały płyty zbrojone prętami stalowymi.

Analizując płyty o grubości 60 mm, analogicznie jak w przypadku płyt o grubości 40 mm wykonano zestawienie porównujące charakterystyczne zachowanie się płyt pod obciążeniem w zależności od sposobu zbrojenia (rys. 11b). Podobnie jak w przypadku płyt o grubości 40 mm mogącą przenieść największe obciążenie, przy zachowaniu jak najmniejszego odkształcenia, okazała się płyta zbrojona prętami stalowymi (PS). W niewiele większym stopniu odbiegała od niej płyta ze stalowym zbrojeniem rozproszonym (PFS).

Na podstawie uzyskanych wyników badań mieszanki betonowej (tab. 1) możemy zauważyć, że wykonane próbki z mieszanki betonowej o tym samym składzie z dodatkiem włókien polimerowych osiągnęły mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż próbki bez ich dodatku. Średni spadek wytrzymałości w tym przypadku wyniósł 13%. Natomiast dodanie włókien stalowych pozytywnie wpłynęło na wytrzymałość na ściskanie zwiększając jej średnią wartość o ok. 3%.

W przypadku konstrukcji cienkościennych zaburzenia stanu równomiernego obciążenia bardzo niekorzystnie wpływają na pracę konstrukcji. Szczególnie niebezpieczne stają się siły skupione obejmujące mały fragment powłoki. Prowadzone badania i uzyskane w ich trakcie wyniki pokazują charakter zarysowania i moment, w którym ono następuje.

Na podstawie wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań można wnioskować, że zastosowanie rozproszonego zbrojenia stalowego daje większą możliwość do osiągnięcia oczekiwanego rezultatu. Wymaga to jednak dalszych badań z różną ilością włókien i zwiększenia oddziałującej siły na element. Opisane w artykule badania obejmowały tylko początkową fazę obciążania i wnioski o możliwym zastąpieniu zbrojenia stalowego alternatywnym są wstępne i wymagają dalszych pogłębianych analiz.

## Podziękowania

**Badanie zostało wykonane w ramach Grantu Rektorskiego Nr 504 440 300093 pt.: Badania zginanych cienkich płyt betonowych wzmacnianych zbrojeniem rozproszonym FRP przyznanego w roku 2021 dla studentów, członków Koła Naukowego Żelbetnik działającego przy Zakładzie Konstrukcji Betonowych i Metalowych na WIL, PW.**

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarnecki L., Kurodowski W., Tendencje kształtujące przyszłość betonu. Budownictwo, Technologia, Architektura 1/2007, str. 50–55
- [2] Karwowska J., Łapko A., Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych, Archives of Civil Engineering 2, 1/2011, str. 41–46
- [3] Lameiras R., Barros J. A. O., Azenha M., Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC), Cement & Concrete Composites 59, 2015, str. 60–76
- [4] Al-Baghdadi H. M., Al-Merib F. H., Ibrahim A. A., Hassan R. F., Hussein H. H., Effects of Coarse Aggregate Maximum Size on synthetic/Steel Fiber Reinforced Concrete Performance with Different Fiber Parameters, Buildings 11/2021, str. 158
- [5] Figueired A. D., Ceccato M. R., Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test, Mater. Res. 18, 2015, str. 1284–1290
- [6] Katzer J., Wpływ włókien stalowych na właściwości kompozytów, Wydawnictwo Auto, 2008
- [7] Ye J., Cui C., Yu J., Yu K., Dong F., Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete, Construction and Building Materials 281, 2021, art. 122586
- [8] Elshafie S., Whittleston G., A review of the effect of basalt fibre lengths and proportions on the mechanical properties of concrete, International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET) 1/2015, str. 458–465
- [9] Jianxun M., Xuemei Q., Liato C., Yunlong W., Experimental research on the fundamental mechanical properties of presoaked basalt fiber concrete, CICE2010, The 5th Inter. Conf. on FRP Comp. in Civil Eng., September 2010, Beijing, China, str. 85–88
- [10] Borhan T. M., Thermal and mechanical properties of basalt fibre reinforced concrete. World Academy of Science, Engineering and Technology 7/2013, str. 334–337
- [11] Tabsheer A., Abid A., Manohar S. C., Experimental study on mechanical properties of basalt fibre reinforced concrete, IJSR, 2013
- [12] Fathima Irine I. A., Strength aspects of basalt fiber reinforced concrete. Inter. Jour. of Innov. Research in Advan. Eng. (IJRAE) 1, 8/2014, str. 192–198
- [13] Palchik P. P., On control testing of fiber-concrete samples to determine their compression and tensile strength at bending. Protocol No 64-1-11, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2011
- [14] Wang J., Zhang Y., Experimental research on mechanical and working properties of non-dipping chopped basalt fiber reinforced concrete, China, Innovation Management and Industrial Engineering 4/2010, str. 635–637
- [15] Arivalagans., Study on the compressive and split tensile strength properties of basalt fibre concrete members, Global Journal of Researches in Engineering Civil and Structural Engineering 12, nr 4 Version 1.0 Year 2012, str. 22–28
- [16] Chen F., An Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete, Applied Mechanics and Materials, tom 405–408, 2013, str. 2767–2770
- [17] Ketan G., Kulkarni S. M., The performance of basalt fibre in high strength concrete. Jour. of Infor., Know. and Res. in C. Eng., 12 to 13, 2/2012, str. 117–123
- [18] Trinh-Duc D., Piotrowski A., Ajdukiewicz C., Wojciechowski P., Gajewski M., Estimation of Post-Cracking Dissipation Capabilities of Fiber Reinforced Concretes in Three Point Bending Test Monitored with Application of Digital Image Correlation System. Materials, 2021, doi.org/10.3390/ma141750088
- [19] Włodarczyk M., Jędrzejowski I., Concrete slabs strengthened with basalt fibres – experimental tests results, Procedia Engineering 153 ( 2016 ) 866 – 873, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.200
- [20] Protchenko K., Dobosz J., Urbański M., Garbacz A., Wpływ substytucji włókien bazaltowych przez włókna węglowe na właściwości mechaniczne prętów B/CFRP (HFRP), Czasopismo ILŚIA, JCEEA 63, 1/2016, str. 149–156
- [21] Runkiewicz L., Wpływ korozji na zagrożenia i awaryjność obiektów budowlanych, Przegląd Budowlany 12/2016, str. 32–37
- [22] Garbacz A., Szmigiera E., Urbański M., Protchenko K., Kubas M.: O badaniach hybrydowego zbrojenia FRP do konstrukcji infrastrukturalnych z betonu, Inżynieria i Budownictwo 8/2017, str. 63–68
- [23] Woyciechowski P. P., Jackiewicz-Rek W., Ocena jakości estetycznej włókno-cementowych prefabrykatów elewacyjnych z betonu, Materiały Budowlane 9/2021, str. 32–35, doi:10.15199/33.2021.09.06
- [24] Woyciechowski P. P., Adamczewski G., Radomski W. i in., Warunki wykonywania posadzek betonowych a ich jakość eksploatacyjna, Materiały Budowlane 5/2014, str. 8–10

# Analiza zagadnienia korozji biologicznej w budownictwie wielkopłytyowym

## Analysis of biological corrosion in large-panel construction

dr inż. Agnieszka Kaliszuk-Wietecha (ORCID: 0000-0003-2476-6951), Zofia Wlazłowska, Ewa Ludwiszewska, Julia Piotrowska, Natalia Sawczuk – studenci, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7440

**Streszczenie:** Artykuł analizuje przyczyny występowania korozji biologicznej w budownictwie wielkopłytyowym, wskazując na kluczową rolę mostków cieplnych i źle działającej wentylacji. Przedstawiono nowoczesne metody diagnostyczne służące do wykrywania ognisk zagrzybienia. Wykazano, że skuteczna termomodernizacja wymaga zintegrowanego podejścia, łączącego poprawę izolacyjności przegród z modernizacją systemów wentylacyjnych i edukacją mieszkańców.

**Słowa kluczowe:** grzyb, pleśń, wielka płyta, termomodernizacja, korozja biologiczna, kondensacja powierzchniowa, budownictwo wielkopłytyowe.

**Abstract:** This article analyzes the causes of biological corrosion in large-panel buildings, highlighting the critical role of thermal bridges and faulty ventilation in the process of surface condensation. Modern diagnostic methods for detecting mould growth locations are presented. The study demonstrates that effective thermal retrofitting requires an integrated approach, combining improved building envelope insulation with the modernization of ventilation systems and resident education.

**Keywords:** biological corrosion, fungus, mould, large-panel, thermal modernization, ventilation, surface condensation.

## 1. Wprowadzenie

Problem korozji biologicznej w postaci występowania grzybów pleśniowych w mieszkaniach, często obecny w budownictwie wielkopłytyowym, był sygnalizowany już w trakcie wznoszenia dużej liczby tego typu obiektów [1]. Szacuje się, że odsetek budynków dotkniętych tym problemem w Europie wynosi 25–45% [2]. W dobie wzmożonej świadomości i zainteresowania poprawą jakości powietrza wewnętrznego, a także ogólnie jakości życia w istniejących budynkach [3], kluczowym jest zrozumienie przyczyn oraz konsekwencji obecności grzybów i pleśni, a także sposobów walki z nimi.

Grzyby szkodliwie wpływają na zdrowie, wywołując m.in. zapalenie spojówek, astmę oraz nasilone infekcje dróg oddechowych [4]. Zależnie od gatunku mogą pojawić się również zmęczenie, bóle głowy, nudności oraz problemy skórne i żołądkowo-jelitowe. Choć skutki krótkiej ekspozycji są zazwyczaj odwracalne, długotrwały kontakt prowadzi do zmian nieodwracalnych, w tym do czterokrotnego wzrostu ryzyka zachorowania na astmę.

Poza niebezpieczeństwem dla zdrowia korozja biologiczna ma również negatywny wpływ na konstrukcję budynków i może prowadzić do destrukcji strukturalnej materiałów budowlanych oraz wpływa na pogorszenie się parametrów cieplnych materiałów, co powoduje skutki finansowe [5].

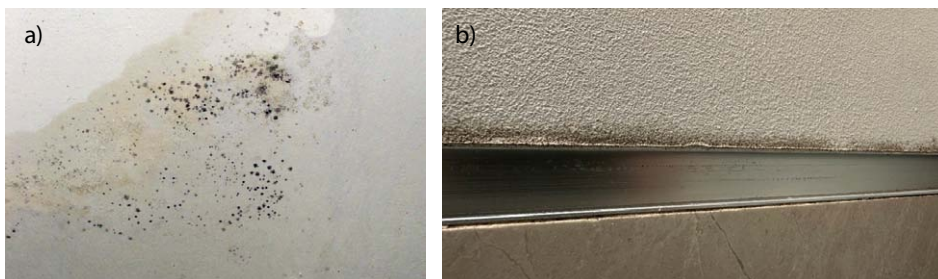
Kwestia ograniczenia ryzyka wystąpienia korozji biologicznej, niezależnie od rodzaju i gatunku mikroorganizmów, jest istotnym elementem procesu termomodernizacji, ponieważ wadliwe działania w tym zakresie mogą spotęgować problem [2].

## 2. Przyczyny występowania korozji biologicznej w budynkach

Czynniki środowiskowe, takie jak odpowiedni zakres temperatury i wilgotności oraz dostępność materiałów organicznych stanowiących pożywienie mają decydujący wpływ na ryzyko wystąpienia oraz prędkość wzrostu grzybów pleśniowych. Woda jest kluczowym parametrem, ponieważ wszystkie gatunki grzybów wymagają wysokiej wilgotności, aby rozpocząć kiełkowanie, co przedstawione jest na rysunku 1. W kwestii odpowiednich warunków do wzrostu, badania wykazały możliwość rozwoju grzybów pleśniowych w zakresie wartości temperatury od -5°C do 50°C, jednakże typowe ich gatunki występujące wewnątrz budynków wymagają wilgotności względnej powyżej 70% oraz wartości temperatury od 20 do 30°C, z optymalną średnią wynoszącą 27°C [6]. Zakresy te wahają się zazwyczaj w kierunku wyższej wilgotności względnej przy niższych temperaturach oraz niższej wilgotności względnej przy wyższych temperaturach [7]. Należy również wziąć pod uwagę, że wahania temperatury mają mniejszy wpływ na wzrost grzybów pleśniowych niż zmiany wilgotności względnej. Wyższe wartości temperatury zazwyczaj wiążą się ze zwiększonym wzrostem mikroorganizmów. Jednakże, ponieważ niska temperatura danej przegrody zwiększa prawdopodobieństwo kondensacji (wykraplania wody) na niej, temperatura nie może być jedynym parametrem jednoznacznie charakteryzującym wzrost grzybów pleśniowych.

W związku z ryzykiem wystąpienia kondensacji na powierzchni danej przegrody przy wysokiej wilgotności względnej powietrza

**Rys. 1.** Rozwój grzybów pleśniowych na przegrodzie zawilgoconej: a) w wyniku podciągania kapilarnego wilgoci, b) w wyniku kondensacji powierzchniowej w pomieszczeniu o nadmiernej wilgotności powietrza (zdjęcia własne)



wewnętrznego, kluczowe znaczenie ma wartość czynnika temperaturowego  $f_{Rsi}$ , wyznaczanego na podstawie temperatury jej powierzchni wewnętrznej. W przypadku przegród zewnętrznych, temperatura powierzchni wewnętrznej zależy od ich właściwości termofizycznych i warunków zewnętrznych. Jeśli temperatura powierzchni wewnętrznej przegrody osiągnie temperaturę punktu rosy dla powietrza wewnętrznego, może dojść do kondensacji [6], co jak wskazano wyżej przyczynia się do rozwoju grzybów pleśniowych. W przypadku budynków wielkopłytowych, projektowe grubości izolacji termicznej wynosiły zwykle 5–10 cm, czyniąc opisane wyżej zjawisko znaczącym problemem w tego typu obiektach. Istotną rolę w procesie powstawania korozji biologicznej odgrywają mostki cieplne. Są to miejsca w obudowie budynku o zwiększonym przepływie ciepła w stosunku do reszty przegrody, co sprzyja kondensacji powierzchniowej pary wodnej w tych miejscach na powierzchni wewnętrznej przegrody. Korozja biologiczna w tych miejscach jest ściśle związana z czynnikiem temperatury powierzchni  $f_{Rsi}$ . Przyjmuje się, że grzyby pleśniowe mogą zacząć rosnąć na powierzchni ściany, gdy wilgotność względna powietrza bezpośrednio przy niej (tzw. wilgotność powierzchniowa) osiągnie 80% – nawet jeśli w całym pomieszczeniu jest dużo niższa. Analizę dotyczącą zależności wilgotności, temperatury i parametrów przegród jest prowadzona z użyciem modelu Lowest Isoleth for Mould (LIM), który uznaje się za precyzyjne narzędzie do identyfikacji rzeczywistych zagrożeń mikrobiologicznych [8]. Model ten wyznacza graniczne parametry temperatury i wilgotności (tzw. izoplety), powyżej których na powierzchniach przegród rozwijają się grzyby. Klasyfikuje on podłoża na podatne na zagrożenia biologiczne (LIM B I) oraz porowate o zwiększonej odporności (LIM B II), korzystając z profesjonalnych baz danych, np. programu WUFI. Analizy z zastosowaniem modelu dowodzą, że decydującym czynnikiem jest nadmierna wilgotność powietrza – w źle wentylowanych pomieszczeniach nawet doskonała izolacja ściany ( $U = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) nie gwarantuje ochrony przed problemem zagrzybienia.

Grzyby pleśniowe rozwijają się na materiałach celulozowych (płyty gipsowo-kartonowe, tapety) oraz na kurzu domowym. Dzięki zanieczyszczeniom, takim jak tłuszcze, potrafią zasiedlać nawet beton, a dodatki chemiczne do tynków i farb mogą z czasem stać się ich pożywką [6]. Chropowatość i porowatość powierzchni dodatkowo sprzyjają gromadzeniu się wilgoci i brudu, co katalizuje wzrost mikroorganizmów.

Budynki wznoszone w technologii wielkiej płyty od lat 60. ubiegłego wieku to obiekty, których według różnych szacunków jest w Polsce ok. 60 tysięcy. Technologia ich wznoszenia była ekonomiczną i szybką odpowiedzią na ogromne problemy

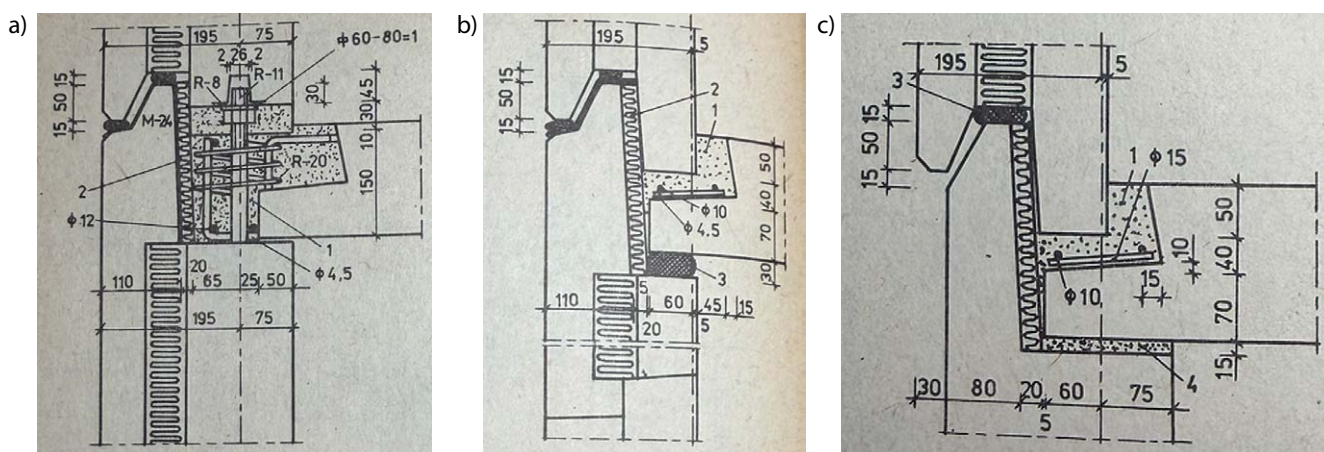
mieszkaniowe po II wojnie światowej. Jednak to szczególnie w tych budynkach, ze względu zarówno na ich wiek, jakość ówczesnych materiałów, sposób użytkowania skupiło się wiele poniższych czynników sprzyjających rozwojowi grzybów.

- Mostki cieplne. Budynki wielkopłytowe, przez mostki cieplne na łączeniach płyt (rys. 2) i porowaty beton, są wysoce podatne na występowanie korozji biologicznej. Niestety docieplenie przegród, zamiast rozwiązywać problem, może, w niektórych przypadkach, uwięzić wilgoć, tworząc ukryte siedliska grzyba, których zarodniki przenikają do mieszkań, negatywnie wpływając na zdrowie lokatorów [3]. Stała obecność mikroorganizmów sprzyja także korozji elementów konstrukcyjnych.

- Nieszczelności wynikające z technologii łączenia elementów oraz starzenia się materiałów i elementów. Infiltracja powietrza zewnętrznego przez nieszczelności może mieć dwójaki wpływ na rozwój korozji biologicznej. Z jednej strony większa infiltracja intensyfikuje działanie wentylacji grawitacyjnej co zmniejsza zawartość pary wodnej w powietrzu. Z drugiej zaś nieszczelności powodują zwiększenie zapotrzebowania na energię cieplną (skutkują niższymi temperaturami wewnętrznymi zimą i wyższymi temperaturami latem [6] i bezpośrednio obniżają temperaturę powierzchni przegród przy miejscu nieszczelności zwiększając ryzyko kondensacji powierzchniowej i rozwoju grzybów pleśniowych.

- Brak odpowiedniej wymiany powietrza wentylacyjnego związany z nieefektywnym działaniem lub niedożnością istniejących systemów wentylacji grawitacyjnej. Ograniczony ruch powietrza i niewydolna wentylacja to główne przyczyny rozwoju korozji biologicznej i pogorszenia jakości powietrza w budynkach. W gęsto zamieszkałych obiektach pasywna wymiana powietrza przez nieszczelności często nie wystarcza do usunięcia wilgoci generowanej przez lokatorów, co sprzyja kondensacji. Dlatego częste wietrzenie mieszkań przez otwieranie okien (deklarowane przez 80% badanych) jest kluczowe dla intensyfikacji wymiany powietrza i redukcji stężenia zarodników.

- Nawyki mieszkańców, z których dużą grupę stanowią osoby starsze lub rodziny o niższym statusie materialnym. Badania potwierdzają związek między liczbą lokatorów a występowaniem korozji biologicznej. Szacuje się, że nawyki mieszkańców odpowiadają za emisję 35% pary wodnej w lokalach [6]. Większe zagęszczenie osób zwiększa emisję wilgoci (oddychanie, gotowanie, mycie) oraz ryzyko wnoszenia zarodników z zewnątrz. Na wilgotność wpływają też nawyki, takie jak uprawa roślin, posiadanie zwierząt czy suszenie prania [7].



**Rys. 2.** Złącza poziome ścian zewnętrznych ze stropami: a) ściana nośna, b) ściana osłonowa, c) ściana na poziomie stropu piwnicy 1 – beton, 2 – styropian, 3 – neopren lub poliuretan, 4 – zaprawa [9]

- Zaniedbania związane zarówno ze starzejącą się technologią, jak i brakiem regularnych zabiegów konserwatorskich i remontowych. Ryzyko korozji biologicznej rośnie wraz z wiekiem budynku. Starsze obiekty są bardziej podatne na skażenia mikrobiologiczne ze względu na degradację izolacji oraz gorsze parametry okien, co sprzyja kondensacji [5]. Dodatkowo zaniedbania konserwatorskie i awarie instalacji tworzą ogniska wilgoci [3], a niesprawna wentylacja (brak systemów wentylacji mechanicznej lub hybrydowej) uniemożliwia skuteczne usuwanie zarodników i pary wodnej.

### 3. Sposoby detekcji i diagnostyka skażenia biologicznego

Standardowym, a zarazem pierwotnym etapem diagnostyki budowlanej pozostaje makroskopowa ocena wizualna przegród. Jest ona niestety metodą niewystarczającą do wczesnego wykrywania korozji biologicznej, a moment wykrycia stanowi często stadium zaawansowane. Dodatkowo istotny jest mechanizm skażenia wtórnego, w którym nawet jeśli pleśń jest fizycznie zamknięta wewnątrz przegrody, rozwijają się tzw. mikrobiologiczne lotne związki organiczne (mVOC), czyli produkty metabolizmu grzybów. Są one odpowiedzialne za charakterystyczny zapach stęchlizny i swobodnie przenikają przez materiały budowlane. Najczęstszym zjawiskiem jest również tendencja do nawrotu problemu, w krótkim czasie po usunięciu widocznej pleśni z powierzchni przegrody np. przez jej zamalowanie, podczas gdy ognisko ukryte pozostaje aktywne i nienaruszone [3]. Skuteczna detekcja musi wykraczać poza inspekcję wizualną, obejmując zaawansowane metody diagnostyczne. Jedną z takich metod jest analiza mikrobiologiczna kurzu osiadłego (*Mold Specific Quantitative Polymerase Chain Reaction*), pozwalająca na wykrycie śladów DNA grzybów i ocenę historycznego skażenia lokalu. Metoda ta wykrywa nie tylko żywe komórki, ale również fragmenty martwej grzybni i zarodników, które zachowują potencjał toksykologiczny i alergizujący. Próbkę pobierane są z miejsc o niskiej częstotliwości sprzątania tj. góry szaf oraz listwy przypodłogowe za meblami, a następnie na podstawie

analizy gatunków grzybów, wyznaczany jest wskaźnik skażenia. W ten sposób powstaje obiektywna ocena, czy badany lokal wymaga profesjonalnego oczyszczenia, nawet przy braku widocznych ognisk [5].

W budownictwie wielkopłytowym, gdzie wiele wad ukrytych znajduje się wewnątrz złączy płyt bądź pustek technologicznych, metodą bezpośredniej weryfikacji stanu struktur wewnętrznych jest wideoendoskopia. Pozwala na odróżnienie powierzchniowych zabrudzeń od głębokiej penetracji grzybni w strukturę materiału izolacyjnego. Przeprowadza się ją poprzez wykonanie otworów inspekcyjnych o średnicy zaledwie kilku milimetrów i wprowadzeniu elastycznej sondy z kamerą. Metoda ta pozwala na dokładną weryfikację stanu warstw izolacyjnych np. wełny i styropianu, wewnątrz przegród. Dodatkowo za jej pomocą można ocenić szczelność połączeń w strefach dylatacyjnych i przeprowadzić inspekcję wnętrza szachtów w poszukiwaniu ognisk korozji biologicznej wynikającej z kondensacji wewnętrznej.

Kolejną metodą diagnostyczną jest termowizja, która jest kluczowym narzędziem detekcji nieniszczącej, pozwalającym na fizyczne zlokalizowanie przyczyny korozji biologicznej. Kamera termowizyjna wizualizuje defekty izolacji w złączach np. płyt prefabrykowanych oraz wskazuje miejsca o obniżonej temperaturze, które są obszarami o najwyższym ryzyku kondensacji powierzchniowej. Dodatkowo podczas badania, można wykryć tzw. infiltrację powietrza zewnętrznego przez nieszczelne uszczelki okienne lub mikropęknięcia w strukturze ścian. Infiltracja zimnego powietrza miejscowo wychładza przegrodę, co inicjuje proces wykraplania wilgoci wewnątrz struktury materiału (rys. 3 i 4).

### 4. Rozwiązania techniczne i wyzwania przy termomodernizacji budynków wielkopłytowych

Współczesne podejście do poprawy jakości zasobów mieszkaniowych – szczególnie w kontekście osiedli wzniesionych w technologii wielkopłytowej w latach 70. i 80. XX wieku – wymaga

zintegrowanych działań. Muszą one obejmować zarówno podniesienie izolacyjności cieplnej przegród, jak i kompleksową modernizację systemu wentylacji.

Termomodernizacje budynków wielopłytowych stanowią nie lada wyzwanie, dlatego trzeba podchodzić do nich systemowo, z jednoczesnym uwzględnieniem specyfiki każdego obiektu. Można zaproponować tu poniższą kolejność działań.

- Dokładne rozpoznanie problemu z zastosowaniem zaawansowanej diagnostyki, zwłaszcza w kontekście korozji biologicznej oraz ewentualnych wad ukrytych. Wykonanie raportów termowizyjnych identyfikujących problemy poszczególnych obiektów, zbadanie temperatury promieniowania przegród zewnętrznych, wykonanie badań szczelności, badania mikologiczne i inne prace pozwalające na dokładne rozpoznanie problemów występujących w konkretnych obiektach.

- Analiza potencjału termomodernizacyjnego w kontekście docieplenia przegród. Zgodnie z aktualnymi przepisami techniczno-budowlanymi [10], współczynnik przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych nie może przekraczać  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Dla porównania docieplenia realizowane w latach 80. XX wieku charakteryzowały się współczynnikiem na poziomie ok.  $0,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Oznacza to, że wymagania dotyczące izolacyjności są obecnie trzykrotnie wyższe. Należy jednak zaznaczyć, że sama operacja docieplenia, jeśli zostanie przeprowadzona bez uwzględnienia fizyki budowli może paradoksalnie pogorszyć stan sanitarny mieszkań. Zablokowanie naturalnej filtracji powietrza bez wprowadzenia alternatywnej wentylacji prowadzi do kumulacji wilgoci wewnątrz pomieszczeń. Kluczowym wyzwaniem jest właściwy dobór materiałów termoizolacyjnych i barier ochronnych. Wełna mineralna, mimo wysokiej paroprzepuszczalności, po nasyceniu wilgocią traci swoje właściwości izolacyjne, co sprzyja rozwojowi grzybów. Styropian natomiast skutecznie ogranicza kondensację wewnątrz przegrody, lecz jego niska paroprzepuszczalność nakłada bezwzględną konieczność zapewnienia wydajnej wentylacji. Nowoczesne rozwiązania wskazują na wysoką skuteczność stosowania inteligentnych barier paroszczelnych o zmiennym oporze dyfuzyjnym [4]. Membrany te dynamicznie dostosowują swoją przepuszczalność do wilgotności otoczenia. Pozwala to na wysychanie przegrody w kierunku wnętrza pomieszczenia (szczególnie w okresach letnich), co jest kluczowe dla uniknięcia kondensacji wilgoci pod warstwą izolacji.

- Dostosowanie systemu wentylacyjnego do specyfiki obiektu i potrzeb jego mieszkańców. Równie istotna jest ewolucja systemów wentylacyjnych, gdyż tradycyjna wentylacja grawitacyjna w uszczelnionych budynkach jest często niewystarczająca [5]. Rozwiązaniem o wysokiej efektywności są zdecentralizowane systemy wentylacji z odzyskiem ciepła, które pozwalają na wymuszenie obiegu powietrza przy jednoczesnym ograniczeniu strat energii [5]. Skuteczność takich strategii potwierdzają badania prowadzone w zimnych klimatach, gdzie szczelność obudowy połączona z mechaniczną wentylacją pozwoliła na znaczący spadek stężeń zarodników grzybów, takich jak *Penicillium* czy *Aspergillus* [7].



Rys. 3. Mostki termiczne nad otworem okiennym (zdjęcie własne)



Rys. 4. Mostki termiczne na ścianie zewnętrznej budynku (zdjęcie własne)

- Zastosowanie dostępnych systemów monitorowania środowiska wewnętrznego. Uzupełnieniem działań konstrukcyjnych jest wdrożenie aktywnych systemów kontroli środowiska wewnętrznego. Wykorzystanie algorytmów uczenia maszynowego pozwala na przewidywanie ryzyka wystąpienia korozji biologicznej z dużym wyprzedzeniem, co umożliwi automatyczne sterowanie wentylacją. Ponadto badania dowodzą, że nawet niewielki wymuszony ruch powietrza bezpośrednio przy powierzchni materiałów budowlanych drastycznie hamuje kiełkowanie zarodników grzybów, takich jak *Cladosporium*. W ramach prewencji materiałowej należy unikać podłoży organicznych (np. tapet papierowych) na rzecz wykończeń mineralnych lub powłok z dodatkami biobójczymi [4].

- Edukacja mieszkańców dla zminimalizowania nawrotom problemów związanych z korozją biologiczną. Problem biokorozji jest dodatkowo potęgowany przez niewłaściwe nawyki lokatorów oraz brak tzw. sezonowania budynku – procesu naturalnego odparowywania wilgoci technologicznej po pracach remontowych – w połączeniu z zaklejaniem kratek wentylacyjnych przez lokatorów w obawie przed utratą ciepła, tworzy wewnątrz mieszkań „pułapki wilgotnościowe” [1]. Dążenie

do nadmiernej szczelności bez zapewnienia kontrolowanego nawiewu – na przykład poprzez zbyt szczelną stolarkę okienną pozbawioną nawiewników – zmienia lokale w izolowane przestrzenie sprzyjające kondensacji pary wodnej. Prawidłowa modernizacja musi zatem stanowić syntezę trzech filarów: profilaktyki konstrukcyjnej, nowoczesnych technologii wentylacyjnych oraz edukacji użytkowników. Jest to jedyna droga do trwałego wyeliminowania problemu zagrzybienia w budownictwie wielkopływowym.

## 5. Podsumowanie

Problem korozji biologicznej w budynkach wielkopłytych pozostaje ciągłym wyzwaniem. Obecność mikroorganizmów w środowisku wewnętrznym nie tylko wpływa na defekt estetyczny przegród, ale również powoduje znaczące zagrożenie zdrowotne dla osób przebywających w środowisku zakażonym. Dlatego w trosce o budynki i ich mieszkańców, należy efektywnie przeciwdziałać przyczynom umożliwiającym rozwój korozji biologicznej, ponieważ bez eliminacji przyczyn problem ten będzie powracał. Podejmując działania zwiększające efektywność energetyczną, takie jak termomodernizacje, konieczne jest wielopłaszczyznowe podejście: z uwzględnieniem warunków psychrometrycznych, stanu konstrukcji i przegród oraz odpowiedniej wentylacji. Należy także zwiększać świadomość mieszkańców w tym zakresie.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Stramski Z., Korozja biologiczna w budownictwie mieszkaniowym, Ochrona Środowiska, Wydawnictwo Oddział Dolnośląskiego Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, 1984
- [2] Brambilla A., Sangiorgio A., Mould growth in energy efficient buildings: Causes, health implications and strategies to mitigate the risk, Renewable and Sustainable Energy Reviews, ScienceDirect, 2020
- [3] Coulburn L. i inni, Building and Environment, Field practitioners' perspectives of challenges and practices that hinder effective mould assessment and remediation in Australian residential buildings, Elsevier, 2026
- [4] Salana S. i inni, Journal of Hazardous Materials, Toxicological interactions between biotic and abiotic components of indoor air: Mold and air fresheners, Elsevier, 2026
- [5] Liu Y. i inni, Building and Environment, Assessment of hygrothermal performance and mould growth risk in roofs of post-retrofitted non-dormer and dormer attic rooms with reduced ventilation, Elsevier, 2024
- [6] Kempton L. i inni, Building and Environment, Mould risk evaluations in residential buildings via site audits and longitudinal monitoring, Elsevier, 2021
- [7] Conrad C., Indoor Environments, Indoor mold concentrations, prevalence, and relation to building characteristics in homes in very cold climates, Elsevier, 2025
- [8] Mijakowski M., Analiza rzeczywistych wartości wilgotności powietrza wewnętrznego, 2007
- [9] Siczkowski J., Nejman T., Ustroje budowlane, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002
- [10] Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 16 września 2020 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (wraz z późn. zm.)

## Jednolite Studia Magisterskie na kierunku BUDOWNICTWO

na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej to **Solidny fundament Twojej kariery!**



### Dlaczego warto?

- ✓ Jedna spójna ścieżka do tytułu magistra inżyniera – jedna praca dyplomowa i obrona
- ✓ Program dopasowany do rynku – zielone budownictwo, cyfryzacja, innowacje, BIM
- ✓ Blisko praktyki – zajęcia z ekspertami z branży
- ✓ Prestiżowy dyplom ceniony w Polsce i za granicą!

Nowy program studiów trwa 5 lat i kończy się uzyskaniem tytułu magistra inżyniera budownictwa.



**Dołącz do najlepszych!**

[www.il.pw.edu.pl](http://www.il.pw.edu.pl)

**200**

lat  
Politechniki  
Warszawskiej



Dofinansowane przez  
Unię Europejską



# Trajektorie i warstwy naprężeń głównych oraz ekstremalnego ścinania w belce o przekroju teowym wykonanej z materiału jednorodnego

Trajectories and contours of principal stresses and extreme shear in a T-beam made of homogeneous material

Filip Skwarek, student, Aleksander Szwed (ORCID: 0000-0002-7746-8221), Inez Kamińska (ORCID: 0000-0003-1421-6841), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7441

**Streszczenie:** W pracy przedstawione są warstwy i trajektorie naprężeń głównych i ekstremalnego ścinania w środku i w półce belki swobodnie podpartej o przekroju teowym dla przykładowych danych liczbowych. Trajektorie zostały wykonane za pomocą algorytmu własnego. Pokazane wyniki potwierdzają założenia przyjmowane przy wymiarowaniu belek żelbetowych oraz pozwalają na różnorodne interpretacje wspomagające projektowanie elementów konstrukcyjnych.

**Słowa kluczowe:** belka, teownik, naprężenie główne, ekstremalne ścinanie, trajektoria.

**Abstract:** The paper presents contours and trajectories of principal stresses and extreme shear in the web and flange of a simply supported tee beam for sample numerical data. The trajectories were generated using a custom algorithm. The presented results confirm the assumptions adopted in the design of reinforced concrete beams and allow for various interpretations supporting the design of structural elements.

**Keywords:** beam, tee section, principal stress, extreme shear, trajectory.

## 1. Wprowadzenie

W określeniu wytrzymałości wielu materiałów konstrukcyjnych, takich jak beton, skały i metale, stosuje się hipotezy (kryteria) ekstremalnego naprężenia głównego lub ścinającego [1, 2]. W belkach złożonych z płaskich płyt tworzących półki i środki, poza strefami połączenia, występuje płaski stan naprężenia [1, 3, 4]. Rozkłady sił przekrojowych i stan naprężenia w belkach są powszechnie znane, zwykle jednak nie przedstawia się wartości ani kierunków naprężeń głównych i ekstremalnego ścinania. Jednakże te informacje mogą być przydatne przy kształtowaniu zbrojenia oraz w rozważaniach dotyczących mechanizmu zniszczenia.

Celem tej pracy jest pokazanie kierunków oraz warstw największych i najmniejszych naprężeń normalnych oraz ekstremalnych naprężeń ścinających dla belki swobodnie podpartej o przekroju teowym obciążonej równomiernie. Interesują nas zarówno półka, jak i środek, przy czym trajektorie naprężeń głównych i ekstremalnego ścinania przedstawiamy dla dwóch przypadków położenia osi obojętnej zginania. Materiał jest jednorodny, izotropowy i sprężysty. Zakładamy, że naprężenia normalne rozciągające są dodatnie, a ściskające ujemne.

## 2. Stan naprężenia i trajektorie w belce o przekroju teowym

Rozpatrujemy belkę swobodnie podpartą obciążoną równomiernie, o przekroju teowym, przedstawioną na rysunku 1. Mamy do czynienia z płaskim stanem naprężenia, w środku istnieją  $\sigma_{xx}$  i  $\sigma_{zx}$ , w półce natomiast  $\sigma_{xx}$  i  $\sigma_{yx}$ , a  $\sigma_{zx} \approx 0$ : w środku:

$$\sigma_{xx}(x, z) = \frac{q(L-x)xz}{2I_y} \quad (1)$$

$$\sigma_{zx}(x, z) = \frac{q(L-2x)\left[(h-z_c)^2 - z^2\right]}{4I_y}$$

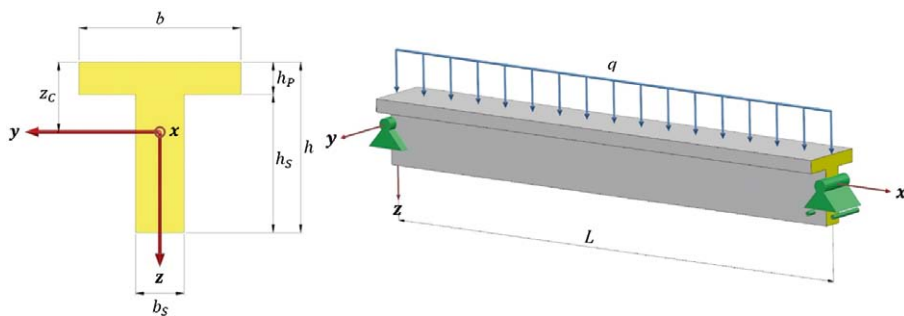
w półce:

$$\sigma_{xx}(x, y) = \frac{q(h_p - 2z_c)(L-x)x}{4I_y} \quad (2)$$

$$\sigma_{yx}(x, y) = \pm \frac{q(L-2x)(h_p - 2z_c)(b-2|y|)}{8I_y}$$

gdzie  $\sigma_{xx}$  to naprężenia normalne, a  $\sigma_{zx}$  i  $\sigma_{yx}$  to naprężenia styczne w kierunkach osi  $z$  i  $y$ ;  $I_y$  oznacza moment bezwładności względem osi  $y$ ;  $b$ ,  $h_p$  i  $z_c$  odpowiednio szerokość i wysokość

**Rys. 1.** Schemat statyczny belki swobodnie podpartej o przekroju teowym



półki oraz odległość osi obojętnej przekroju od krawędzi górnej, jak na rysunku 1.

Naprężenia główne, naprężenie średnie i maksymalne naprężenia tnące są następujące:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \tau_{\max}, \sigma_2 = \sigma_0 - \tau_{\max}, \sigma_0 = \frac{1}{2} \sigma_{xx},$$

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 4\sigma_{ix}^2}, i = y, z \quad (3)$$

gdzie  $\sigma_1 \geq \sigma_2$  oznaczają naprężenia główne,  $\sigma_0$  jest naprężeniem średnim (środkiem koła Mohra), zaś  $\tau_{\max}$  – maksymalnym naprężeniem tnącym (promieniem koła Mohra) [3, 4].

Jeśli,  $i = y$  to równania (3) dotyczą stanu naprężenia w półce, natomiast przy  $i = z$  są dla środniczka. Trajektorie naprężeń głównych  $f(x)$  to linie, które w każdym punkcie są styczne do kierunku  $\sigma_1$  albo  $\sigma_2$ . Dwie rodziny ortogonalnych krzywych określa równanie różniczkowe:

$$\sigma_{ix} \left[ (f'(x))^2 - 1 \right] + \sigma_{xx} f'(x) = 0, i = y, z \quad (4)$$

Natomiast trajektorie ekstremalnego ścinania  $g(x)$  wyznacza się na podstawie zależności:

$$\sigma_{xx} \left[ (g'(x))^2 - 1 \right] - 4\sigma_{ix} g'(x) = 0, i = y, z \quad (5)$$

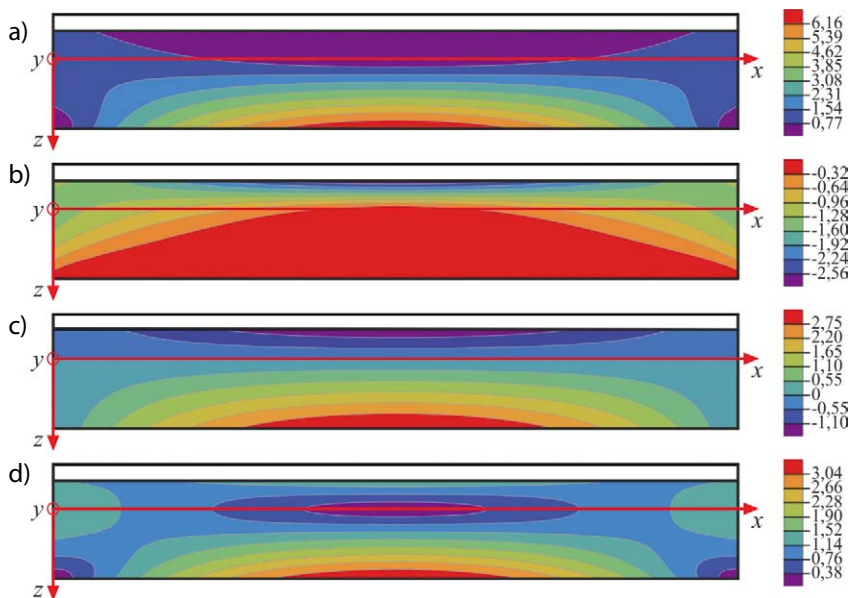
Zagadnienia początkowe dla równań (4) i (5) rozwiązuje się numerycznie. W języku Python został napisany algorytm Eulera całkowania tych równań różniczkowych zwyczajnych.

### 3. Przykłady obliczeniowe

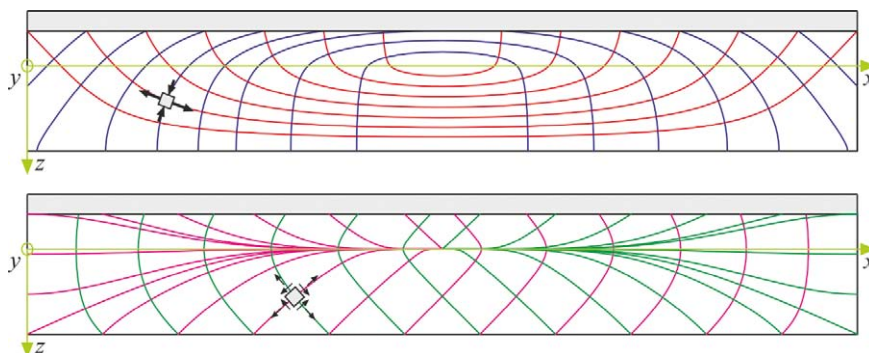
Rozpatrujemy belki z następującymi dwoma przekrojami teowymi, pokazanymi na rysunku 1: (A)  $h_p = 15$  cm,  $h_s = 90$  cm,  $b = 100$  cm,  $b_s = 30$  cm,  $L = 630$  cm,  $q = 10$  kN/cm, oraz (B)  $h_p = 20$  cm,  $h_s = 80$  cm,  $b = 240$  cm,  $b_s = 15$  cm,  $L = 600$  cm,  $q = 10$  kN/cm.

Warstwice naprężeń głównych, naprężenia średniego oraz maksymalnego naprężenia tnącego w środniczku teownika (A) przedstawiamy na rysunku 2. Naprężenia główne w całym obszarze są różnych znaków. Największe rozciąganie (rys. 2a) pojawia się na dolnej krawędzi

przekroju w pobliżu środka rozpiętości belki. W tym samym miejscu występuje największe naprężenie tnące w środniczku (rys. 2d). W strefach przypodporowych  $\sigma_0$  ma małe wartości, natomiast  $\tau_{\max}$  jest umiarkowane, ale w części obszaru belki (pasy rozpoczynające się od osi zginania przy podporach i biegnące ukośnie do dolnych włókien) jest większe od  $\sigma_0$ . W pasie wokół osi obojętnej naprężenie średnie  $\sigma_0$  jest w przybliżeniu zerowe (rys. 2c), zaś naprężenie styczne  $\tau_{\max}$  jest proporcjonalne do wartości siły poprzecznej. Trajektorie maksymalnego naprężenia rozciągającego (rys. 3, góra), z warstwicami na rysunku 2a, w strefie środkowej przebiegają prawie równoległe do osi belki, natomiast w strefach

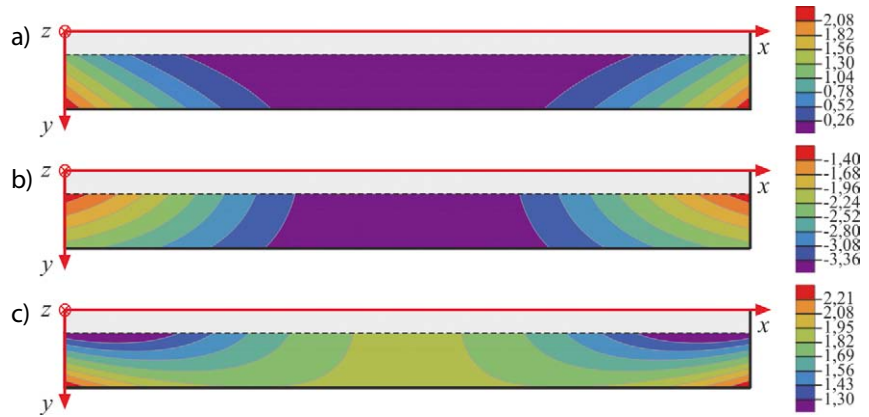


**Rys. 2.** Warstwice  $\sigma_1$  (a),  $\sigma_2$  (b),  $\sigma_0$  (c) oraz  $\tau_{\max}$  (d) w kN/cm<sup>2</sup> w środniczku teownika (A)



**Rys. 3.** Teownik (A): trajektorie naprężeń głównych (górną) i ekstremalnego ścinania (dół)

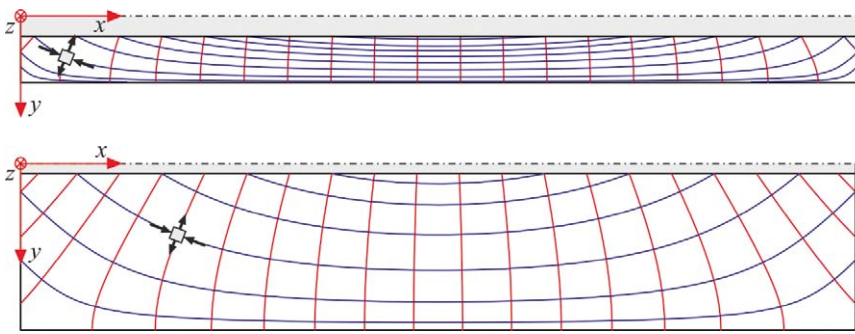
**Rys. 4.** Warstwy naprężeń  $\sigma_1$  (a),  $\sigma_2$  (b) oraz  $\tau_{max}$  (c) w półce teownika (A)



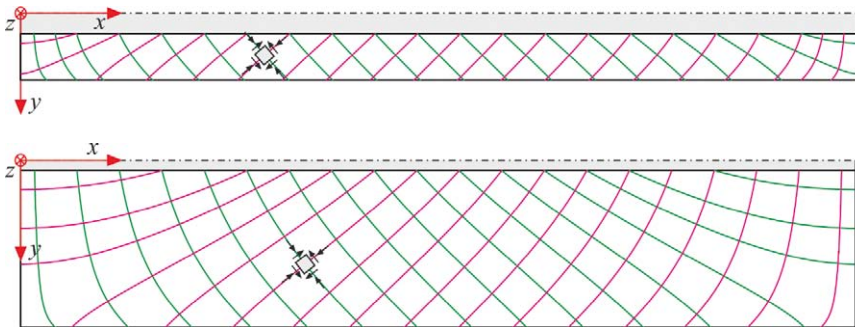
przypodporowych są nachylone pod kątem zbliżonym do 45° względem osi belki. Zaznaczone kolorem niebieskim trajektorie  $\sigma_2$  (ściskania) w sposób przybliżony oddają położenie rys oraz krzyżulców ściskanych (por. rys. 6.5 normy [5] oraz [1, 2, 6]). Natomiast trajektorie ekstremalnego ścinania (rys. 3, dół) ilustrują mechanizm poślizgowego zniszczenia belki.

Warstwy  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  pokazane w środkowej warstwie półki teownika (rys. 4a, b) wskazują, że dominujące rozciąganie pojawia się przy podporach belki, a dominujące ściskanie w po-

pod kątem 45°. Im dalej od tej strefy, tym bardziej krzyżulce ściskane (linie niebieskie, rys. 5) odchylają się od osi belki, co odzwierciedla rys. 6.7 normy [5].



**Rys. 5.** Trajektorie naprężeń głównych w półce: teownik (A) (górną) i teownik (B) (dół)



**Rys. 6.** Trajektorie ekstremalnego ścinania w półce: teownik (A) (górną) i teownik (B) (dół)

bliżu środka rozpiętości. Ekstremalne ścinanie ma relatywnie znaczące wartości w większości obszaru półek, a maksymalne wartości występują w strefach końców belki (rys. 4c). Trajektorie naprężeń głównych i ekstremalnego ścinania dla dwóch teowników (A) i (B) o różnych proporcjach szerokości półek w odniesieniu do szerokości średnicy przedstawiono na rysunkach 5 i 6. W środku rozpiętości występuje największe ściskanie wzdłuż osi belki, a ekstremalne ścinanie

#### 4. Podsumowanie

Warstwy naprężeń głównych obrazują strefy największego rozciągania i ściskania oraz ścinania (wyężenia) w rozpatrywanej belce o przekroju teowym. Natomiast trajektorie naprężeń głównych pokazują kierunki krzyżulców ściskanych i rys (pęknięć) w materiale kruchym. Z kolei trajektorie ekstremalnego ścinania identyfikują linie poślizgu w materiale, który niszczy się w wyniku ścinania. Wykresy trajektorii są cenną wskazówką przy kształtowaniu zbrojenia w belkach żelbetowych [1, 6]. W pracy rozpatrujemy belkę wykonaną z izotropowego materiału jednorodnego, ale kolejnym, lepszym, przybliżeniem będzie uwzględnienie ortotropii i niejednorodności wynikającej z obecności zbrojenia [1, 3].

#### BIBLIOGRAFIA

[1] Nielsen M. P., Hoang L. C., Limit analysis and concrete plasticity. Third edition, CRC Press, Boca Raton, 2011  
 [2] Godycki-Ćwirko T., Mechanika betonu, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1982  
 [3] Szwed A., Jemiolo S., Tarcze sprężyste: zbiór zadań z przykładami, OWPW, Warszawa, 2024  
 [4] Ajdukiewicz C., Szwed A., Wytrzymałość materiałów: wybrane zagadnienia, OWPW, Warszawa, 2022  
 [5] PN-EN 1992-1-1, 2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków  
 [6] Kobiak J., Stachurski W., Konstrukcje żelbetowe. Tom 1. Wydanie szóste, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1995

# Analiza numeryczna kasetonów elewacyjnych wykonanych z aluminium, stali oraz stali kortenowskiej

Numerical analysis of façade panels made of aluminium, steel and corten steel

dr inż. Maciej Cwyl (ORCID: 0000-0002-2894-7840), Paweł Galemba, Mateusz Konopka – studenci, inż. Michał Prochera (ORCID: 0009-0004-3936-7763), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7442

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę numeryczną kasetonów elewacyjnych wykonanych z aluminium, stali oraz stali typu COR-TEN, stosowanych jako elementy okładzin w systemach fasad wentylowanych. Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych z wykorzystaniem modeli powłokowych oraz analizy geometrycznej i materiałowo nieliniowej (GMNIA). Uwzględniono oddziaływania wiatru zgodnie z normą PN-EN 1991-1-4, rozpatrując zarówno parcie, jak i ssanie, a także rzeczywiste warunki podparcia paneli, odpowiadające rozwiązaniom stosowanym w praktyce inżynierskiej. Omówiono zasadność stosowania analizy numerycznej do oceny pracy kasetonów elewacyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem identyfikacji lokalnych koncentracji naprężeń oraz wpływu geometrii, sposobu podparcia i właściwości materiałowych na zachowanie elementu.

**Słowa kluczowe:** fasada wentylowana, kaseton elewacyjny, projektowanie fasad, MES.

**Abstract:** This paper presents a numerical analysis of façade panels made of aluminium, steel, and corten steel, used as cladding elements in ventilated façade systems. The calculations were carried out using the finite element method with shell models and geometrically and materially nonlinear analysis (GMNIA). Wind loads were determined in accordance with PN-EN 1991-1-4, considering both pressure and suction, as well as realistic support conditions reflecting engineering practice. The paper discusses the validity of applying numerical analysis to the assessment of façade panel behaviour, with particular emphasis on the identification of local stress concentrations and the influence of geometry, support conditions, and material properties on the structural response of the elements.

**Keywords:** façade, cladding panel, design, FEA.

## 1. Wprowadzenie

Kasetony elewacyjne stanowią istotny element współczesnej architektury, łącząc funkcje estetyczne i użytkowe. Są powszechnie stosowane jako okładziny ścian zewnętrznych budynków, a ich modułowa budowa umożliwia szybki montaż oraz łatwą wymianę elementów. W elewacjach wentylowanych przyczyniają się do poprawy izolacyjności termicznej i akustycznej przegród.

W zależności od materiału kasetony charakteryzują się zróżnicowanymi właściwościami mechanicznymi. Najczęściej stosuje się aluminium, stal oraz stal kortenowską. Aluminium cechuje się relatywnie małą masą i odpornością na korozję, natomiast stal zapewnia wysoką wytrzymałość, przy konieczności stosowania zabezpieczeń antykorozyjnych.

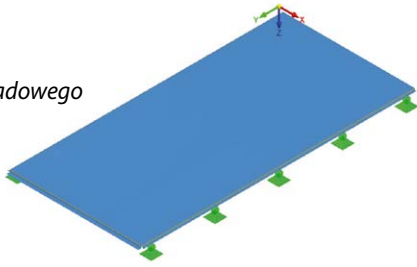
W praktyce inżynierskiej istotne jest uwzględnienie oddziaływań takich jak parcie i ssanie wiatru oraz wpływy termiczne. Analiza numeryczna stanowi w tym zakresie kluczowe narzędzie, umożliwiające ocenę pracy kasetonów, w tym identyfikację lokalnych koncentracji naprężeń w strefach połączeń i zagięć, a także ocenę wpływu oddziaływań zmiennych na trwałość elementów.

## 2. Przedmiot i zakres analizy

Przedmiotem przeprowadzonej analizy były kasetony elewacyjne stosowane jako elementy okładzin w systemach fasad wentylowanych. Opracowanie zostało wykonane na zlecenie podmiotu zewnętrznego w celu oceny pracy kasetonów elewacyjnych pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych. Prace badawcze i obliczeniowe zrealizowano na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Głównym celem analizy było sprawdzenie spełnienia warunków użytkowości oraz nośności, a także identyfikacja zjawisk mających wpływ na trwałość elementów.

Zakres analizy obejmował 27 wariantów kasetonów elewacyjnych różniących się materiałem, geometrią oraz rozwiązaniami konstrukcyjnymi. Rozpatrywano panele wykonane z aluminium, stali konstrukcyjnej oraz stali typu COR-TEN. Kasetony posiadały zunifikowaną długość wynoszącą 2900 mm oraz zróżnicowane szerokości: 1400, 1150, 900 i 650 mm, co odpowiada typowym modułom stosowanym w projektowaniu elewacji. W ramach analizy uwzględniono zarówno kasetony standardowe, jak i warianty wzmocnione dodatkowymi elementami usztywniającymi w postaci kątowników

**Rys. 1.** Widok przykładowego kasetonu



oraz zmodyfikowane geometrycznie poprzez zwiększenie wysokości kasetonu lub dodatkowe zagięcie krawędzi swobodnej. Widok przykładowego elementu o wymiarach 1400x2900mm wraz z pokazanymi punktami podparcia przedstawiono na rysunku 1.

Analizowane elementy stanowiły cienkościennie panele gięte, mocowane punktowo do podkonstrukcji nośnej za pomocą łączników mechanicznych. W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego stosowano pięć lub siedem punktów podparcia rozmieszczonych wzdłuż dwóch krawędzi kasetonu.

### 3. Założenia i model obliczeniowy

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1991-1-4 dla budynku referencyjnego wyznaczono parcie oraz ssanie wiatru działające na kasetony elewacyjne. Jako obiekt referencyjny przyjęto typowy budynek biurowo-usługowy o wymiarach w planie 25x25 m oraz wysokości 50 m, przyjęto 1. strefę wiatrową oraz III kategorię terenu.

Model numeryczny opracowano w programie RFEM 6, przyjmując elementy powłokowe. W analizie zastosowano model materiałowy sprężysto-plastyczny, umożliwiający uwzględnienie zarówno pracy sprężystej, jak i lokalnych uplastycznień w strefach koncentracji naprężeń. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem analizy geometrycznej i materiałowo nieliniowej (GMNIA), co pozwoliło na realistyczne odwzorowanie pracy elementów cienkościennych.

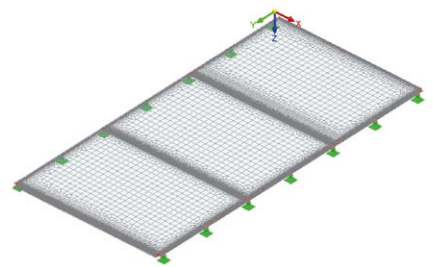
Warunki podparcia odwzorowano zgodnie z rzeczywistym schematem pracy kasetonów. W przypadku ssania wiatru przyjęto punktowe podparcie w miejscach łączników, modelowanych jako niewielkie powierzchnie kołowe z zablokowanymi przemieszczeniami w kierunkach UX, UY oraz UZ. W przypadku parcia wiatru uwzględniono dodatkowo podparcie powierzchniowe w kierunku prostopadłym do płaszczyzny panelu, odpowiadające kontaktowi krawędzi kasetonu z elementami podkonstrukcji.

Siatkę elementów skończonych dostosowano do geometrii analizowanych paneli, stosując lokalne zagęszczenia w strefach przypodporowych, w rejonach otworów montażowych oraz w miejscach zagięć blachy. Widok siatki wraz z zagęszczeniami przedstawiono na rysunku 2.

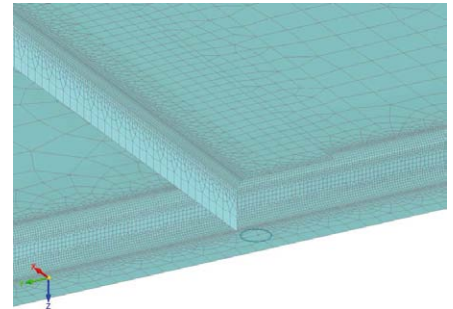
### 4. Wyniki analizy numerycznej

Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały, że charakter pracy kasetonów elewacyjnych jest w dużym stopniu

**Rys. 2.** Widok siatki ES panelu wzmocnionego kątownnikami

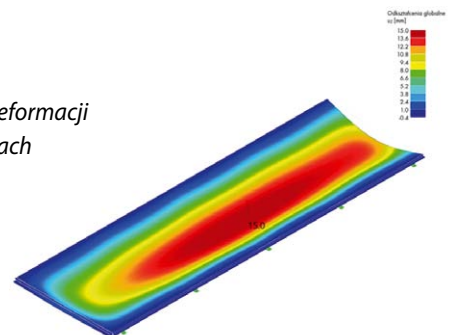


**Rys. 3.** Widok zagęszczenia siatki ES panelu wzmocnionego kątownnikami

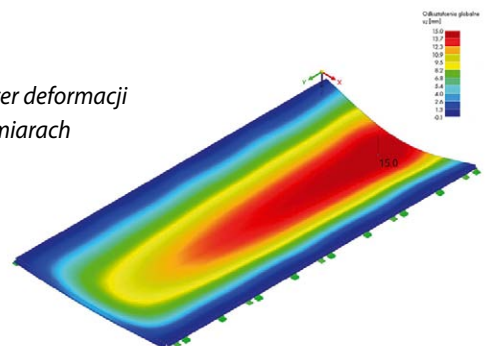


zależny od ich geometrii, sposobu podparcia oraz zastosowanego materiału. Niezależnie od wariantu materiałowego maksymalne ugięcia występują w rejonie krawędzi swobodnych (rys. 4). Wraz ze zmniejszaniem szerokości panelu zaobserwowano przesunięcie obszaru maksymalnych przemieszczeń w kierunku środka elementu (rys. 5) oraz ogólne ograniczenie wartości ugięć.

**Rys. 4.** Charakter deformacji kasetonu o wymiarach 1400x2900 mm

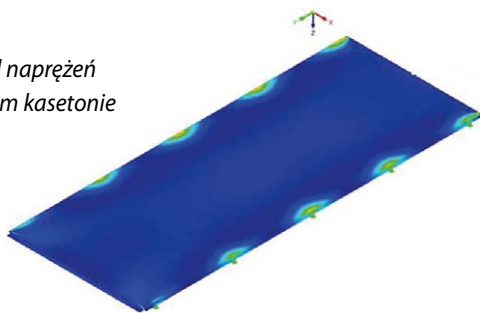


**Rys. 5.** Charakter deformacji kasetonu o wymiarach 900x2900 mm



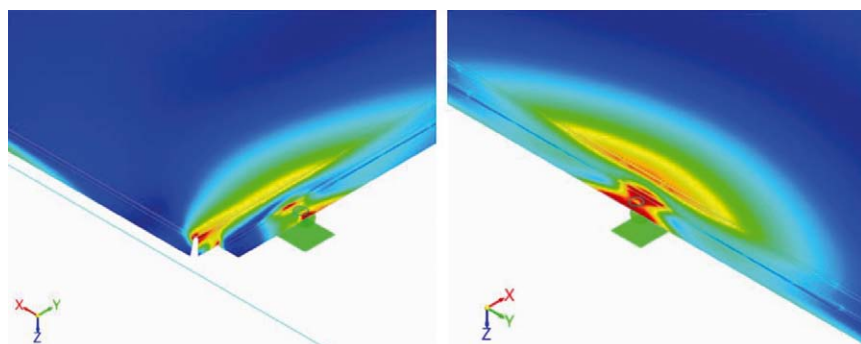
Rozkłady naprężeń mają charakter wyraźnie lokalny. Największe wartości naprężeń zastępczych występują w strefach przypodporowych, w pobliżu otworów montażowych oraz w miejscach zagięć blachy. W przypadku oddziaływania ssania wiatru koncentracje naprężeń są szczególnie intensywne w rejonie łączników, co wynika z punktowego

**Rys. 6.** Rozkład naprężeń w przykładowym kasetonie



przekazywania obciążeń. Dla parcia wiatru obserwuje się bardziej równomierny rozkład naprężeń, związany z powierzchniowym podparciem panelu na podkonstrukcji.

W analizowanym zakresie obciążeń oraz dla przyjętych kryteriów użyteczności (ugięcia do 15–20 mm) nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych odkształceń plastycznych (jako kryterium przyjęto 5%). Maksymalne wartości odkształceń występowały lokalnie i nie przekraczały poziomu granicznego, co potwierdza zachowanie nośności materiałowej wszystkich analizowanych wariantów.



**Rys. 7.** Strefy koncentracji naprężeń

Analiza wykazała, że panele z aluminium i stali, dzięki większej liczbie punktów podparcia, charakteryzują się bardziej równomiernym rozkładem naprężeń w strefach przypodporowych w porównaniu do kasetonów z CorTenu. Jednocześnie różnice w globalnym charakterze deformacji pomiędzy analizowanymi materiałami są niewielkie, a dominującym czynnikiem wpływającym na pracę elementów pozostaje ich geometria. Zastosowanie elementów wzmacniających w postaci kątowników prowadzi do zwiększenia sztywności paneli oraz ograniczenia maksymalnych ugięć, szczególnie w przypadku kasetonów o większej rozpiętości. Jednocześnie w rejonach połączenia kątowników z panelem mogą pojawiać się lokalne wzrosty naprężeń i odkształceń, co wymaga odpowiedniego ukształtowania detalu konstrukcyjnego. W panelach wzmocnionych obserwuje się również podział powierzchni na strefy ugięcia pomiędzy elementami usztywniającymi.

Analiza wariantów zmodyfikowanych geometrycznie wykazała, że zmiana wysokości kasetonu oraz sposób ukształtowania krawędzi swobodnych mają istotny wpływ na jego sztywność i charakter deformacji. Wprowadzenie dodatkowych

przebiegów może prowadzić do zmiany schematu pracy elementu, jednak nie zawsze skutkuje zwiększeniem jego nośności, co wskazuje na konieczność indywidualnej oceny takich rozwiązań.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że o pracy kasetonów elewacyjnych decydują przede wszystkim lokalne efekty konstrukcyjne, związane ze sposobem mocowania oraz geometrią elementu. Analiza numeryczna umożliwia ich identyfikację i stanowi podstawę do racjonalnego projektowania kasetonów, w szczególności w zakresie ograniczania ugięć oraz minimalizacji koncentracji naprężeń.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza numeryczna wykazała, że o pracy kasetonów elewacyjnych decydują przede wszystkim geometria panelu, liczba i rozmieszczenie punktów mocowania oraz właściwości materiałowe. W zakresie stanu granicznego użyteczności kluczowym kryterium są ugięcia paneli. Maksymalne przemieszczenia występują w rejonie

krawędzi swobodnych o najmniejszej sztywności. Węższe panele ze względu na mniejszą rozpiętość mają inny charakter deformacji – maksymalne ugięcie występuje na środku panelu, a nie przy swobodnej krawędzi.

W odniesieniu do stanu granicznego nośności decydujące znaczenie mają lokalne koncentracje naprężeń. Występują one głównie w strefach przypodporowych, przy otworach montażowych oraz w miejscach zagięć blachy. W analizowanym zakresie nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnych odkształceń plastycznych. Wskazuje to na zachowanie nośności materiałowej badanych rozwiązań. Należy jednak uwzględnić wpływ cykliczności obciążeń na trwałość elementów.

Analiza numeryczna może być skutecznym narzędziem oceny pracy kasetonów elewacyjnych, w tym przypadku została wykorzystana do opracowania opinii technicznej na temat wdrażanego produktu. Umożliwia identyfikację lokalnych zjawisk decydujących o ich nośności i trwałości. Stanowi również podstawę do racjonalnego projektowania rozwiązań elewacyjnych.

Analiza numeryczna może być skutecznym narzędziem oceny pracy kasetonów elewacyjnych, w tym przypadku została wykorzystana do opracowania opinii technicznej na temat wdrażanego produktu. Umożliwia identyfikację lokalnych zjawisk decydujących o ich nośności i trwałości. Stanowi również podstawę do racjonalnego projektowania rozwiązań elewacyjnych.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1993 (seria): Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych
- [2] PN-EN 1999 (seria): Eurokod 9: Projektowanie konstrukcji aluminiowych
- [3] PN-EN 1090 (seria): Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych.
- [4] PN-EN ISO 3506 (seria): Części złączne odporne na korozję ze stali nierdzewnej – Własności mechaniczne i fizyczne
- [5] Runkiewicz L., Kopyłow O., Sieczkowski J., Elewacje wentylowane. Diagnostyka stanu technicznego, seria: Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2021
- [6] Błaszczczyński T. Z., Współczesne elewacje. Elewacje wentylowane, Builder, 2/2015, str. 76–79

# Współczesne zastosowania okładzin z blach w ścianach wentylowanych

## Modern applications of metal cladding in ventilated walls

dr inż. Maciej Cwyl (ORCID: 0000-0002-2894-7840), Paweł Galemba (ORCID: 0009-0008-5536-6663), Emil Komuda (ORCID: 0009-0003-4807-6514), Piotr Porycki (ORCID: 0009-0009-0676-6916) – studenci, inż. Michał Prochera (ORCID: 0009-0004-3936-7763), Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7443

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono charakterystykę okładzin z blach stosowanych w ścianach wentylowanych, ze szczególnym uwzględnieniem ich funkcji, wymagań technicznych oraz oddziaływań obciążeń. Celem pracy jest uporządkowanie zasad projektowania oraz identyfikacja czynników wpływających na trwałość i bezpieczeństwo ścian wentylowanych. Omówiono budowę ścian wentylowanych, a także aktualne wymagania techniczne i formalne dotyczące zestawów elewacyjnych. Scharakteryzowano ich podstawowe funkcje, w tym wpływ na trwałość przegród oraz właściwości użytkowe budynków. Szczególną uwagę poświęcono analizie obciążeń oddziałujących na panele elewacyjne, takich jak obciążenie wiatrem oraz oddziaływania termiczne, wskazując na znaczenie prawidłowego projektowania połączeń i dylatacji. W końcowej części omówiono metody analizy obliczeniowej oraz wskazano, że złożoność pracy elementów okładzinowych wymaga stosowania zaawansowanych narzędzi numerycznych, co stanowi punkt wyjścia do dalszych analiz przedstawionych w kolejnym artykule.

**Słowa kluczowe:** fasada, kaseton elewacyjny, ściana wentylowana, obciążenia.

**Abstract:** The paper presents the characteristics of sheet metal cladding used in ventilated façade systems, with particular emphasis on their functions, technical requirements, and load actions. The aim of the study is to systematize design principles and identify factors affecting the durability and safety of ventilated façades. The structure of ventilated façades and the current technical and formal requirements for façade systems are discussed. Their basic functions are characterized, including their impact on the durability of building envelopes and the functional properties of buildings. Particular attention is given to the analysis of loads acting on façade panels, such as wind load and thermal effects, highlighting the importance of proper design of connections and expansion joints. The final part presents computational analysis methods and indicates that the complexity of cladding element behaviour requires the use of advanced numerical tools, which provides a basis for further analyses presented in the subsequent paper.

**Keywords:** façade, cladding panel, ventilated wall, loads.

## 1. Wprowadzenie

Elewacje wentylowane stanowią obecnie jedno z najbardziej dynamicznie rozwijających się rozwiązań w budownictwie. Znajdują zastosowanie w obiektach o zróżnicowanej funkcji i standardzie – od budynków użyteczności publicznej, przez zabudowę mieszkaniową, aż po obiekty infrastrukturalne. Szczególnie często stosowane są w obiektach wielkopowierzchniowych (centra handlowe, terminale lotnicze, hale magazynowe) oraz w budynkach wysokościowych, zarówno nowo projektowanych, jak i poddawanych modernizacji. Przykład wykonanej elewacji wentylowanej przedstawiono na rysunku 1.

## 2. Specyfika ścian wentylowanych

Ściana wentylowana jest układem warstwowym, stanowiącym zestaw współpracujących ze sobą elementów. Podstawę systemu stanowi podkonstrukcja (ruszt), wykonywana najczęściej z aluminium lub stali, rzadziej z drewna lub materiałów kompozytowych. Profile nośne mocowane są do ściany konstrukcyjnej

za pomocą konsoli, przy zachowaniu zasady jednego punktu stałego, co umożliwia kompensację odkształceń termicznych. Układ podkonstrukcji zapewnia jednocześnie możliwość montażu warstwy termoizolacyjnej oraz utworzenia szczeliny wentylacyjnej. Do rusztu mocowane są okładziny elewacyjne, które pełnią funkcję ochronną i estetyczną. W praktyce stosuje się szeroki wachlarz materiałów, w tym płyty włóknisto-cementowe, laminaty HPL, blachy stalowe i aluminiowe, drewno, ceramikę oraz kamień naturalny. Elementy te łączone są mechanicznie lub z wykorzystaniem systemów klejowych.

Współczesne fasady wykonywane są w różnych technologiach, przy czym dominują rozwiązania metalowo-szklane oraz kompozytowe. Choć elewacje wentylowane stanowią stosunkowo niewielki udział w rynku, ich popularność systematycznie rośnie ze względu na trwałość, szybkość montażu oraz wysokie walory użytkowe i estetyczne.

## 3. Wymagania techniczne

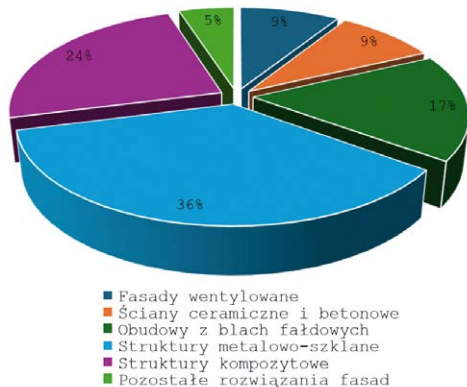
Zgodnie z [1, 2] elewacja wentylowana stanowi zestaw wyrobów budowlanych, a nie pojedynczy komponent – ocenie



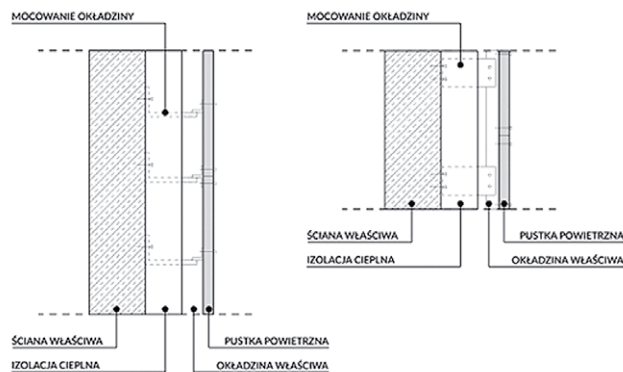
**Rys. 1.** Przykład elewacji wykończonej okładzinami z blach (źródło: Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej)

technicznej podlega zatem kompletna konfiguracja: okładzina, łączniki mechaniczne i podkonstrukcja wsporcza, co determinuje zakres stosowanych norm oraz procedurę dopuszczenia do obrotu.

W zakresie projektowania podkonstrukcji podstawę stanowią normy dla konstrukcji stalowych [3] oraz aluminiowych [4] w powiązaniu z PN-EN 1090 [5], natomiast właściwości samych okładzin regulują odpowiednie normy wyrobowe – np. PN-EN 14782 dla stalowych paneli ściennych [6], a właściwości mechaniczne łączników określają np. PN-EN ISO 3506 [7] dla łączników ze stali nierdzewnej. Właściwości zestawu elewacyjnego opisuje dokument oceny technicznej – na poziomie europejskim w formie Europejskiej Oceny Technicznej (ETA), wydawanej na podstawie wytycznych EAD 090062-00-0404 [1] (zastępujących wycofany w 2018 roku dokument ETAG 034 [2]), na poziomie krajowym zaś w formie Krajowej Oceny Technicznej (KOT), która zastąpiła dawne Aprobaty Techniczne (od stycznia 2017 r.). Niezależnie od wybranej ścieżki, ocena bazuje na parametrach uzyskanych z badań laboratoryjnych przeprowadzonych na zestawie elementów. Co istotne, wytyczne [1, 2] wykluczają stosowanie metod numerycznych jako zastępstwa dla badań laboratoryjnych [8]. Wytyczne [1, 2] opisują ogólne założenia dotyczące wykonania i utrzymania zestawów elewacyjnych, nie zawierają jednak szczegółowych procedur kontroli i odbioru robót montażowych.



**Rys. 2.** Udział ścian wentylowanych na rynku elewacji (opracowanie własne)



**Rys. 3.** Typowy przekrój [15]

W Polsce brak jest dedykowanej normy regulującej to zagadnienie – podstawowym dokumentem krajowym pozostaje opracowanie ITB [9], uzupełnione poradnikiem [10] dotyczącym oceny elewacji w trakcie eksploatacji.

Wprowadzenie do obrotu zestawu elewacji wentylowanej wymaga uzyskania dokumentu oceny technicznej – bazującego na badaniach laboratoryjnych całości zestawu. W Polsce dokumenty te wydaje Instytut Techniki Budowlanej (ITB). Warunkiem dopuszczenia do obrotu jest ponadto wdrożenie przez producenta zakładowej kontroli produkcji (FPC) [2]. Po spełnieniu powyższych wymagań na podstawie uzyskanej oceny technicznej (KOT lub ETA) producent sporządza odpowiednio Krajową Deklarację Właściwości Użytkowych (KDwu) ze znakiem budowlanym B lub Deklarację Właściwości Użytkowych (DoP) z oznakowaniem CE.

#### 4. Funkcja ścian wentylowanych

Podstawową funkcją ściany wentylowanej jest zapewnienie cyrkulacji powietrza w szczelinie wentylacyjnej pomiędzy okładziną a warstwą termoizolacyjną. Przepływ powietrza umożliwia odprowadzanie wilgoci przenikającej z wnętrza budynku, ograniczając ryzyko kondensacji pary wodnej, a tym samym rozwój pleśni i grzybów.

Układ ten wpływa również korzystnie na warunki cieplne budynku. W okresie letnim ogranicza przegrzewanie przegród, natomiast w okresie zimowym stabilizuje warunki pracy warstw przegrody.

Dodatkową zaletą systemów wentylowanych są szerokie możliwości kształtowania estetyki elewacji. Zastosowanie różnorodnych materiałów, faktur i kolorów pozwala na uzyskanie indywidualnego charakteru obiektu oraz maskowanie ewentualnych niedokładności wykonawczych warstw konstrukcyjnych. Elewacje te pełnią również funkcję ochronną, zabezpieczając termoizolację przed oddziaływaniem czynników atmosferycznych oraz poprawiają izolacyjność akustyczną przegrody dzięki obecności szczeliny powietrznej.

Trwałość systemu zależy od wielu czynników, w tym jakości materiałów, poprawności projektu oraz wykonania. Kluczowe znaczenie mają również regularne kontrole techniczne oraz spełnienie wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego.

## 5. Obciążenia

Wśród obciążeń działających na panele elewacyjne można wyróżnić kilka podstawowych grup oddziaływań. Do obciążeń stałych zalicza się ciężar własny elementów, który – ze względu na niewielką grubość i masę paneli – zazwyczaj nie stanowi oddziaływania dominującego.

Kluczowe znaczenie ma natomiast obciążenie wiatrem, będące głównym czynnikiem wpływającym na pracę elewacji. Analiza tego oddziaływania opiera się na dwóch podstawowych schematach: parciu oraz ssaniu wiatru. W przypadku parcia siła działa bezpośrednio na powierzchnię panelu, a sposób jego podparcia powoduje, że obciążenie rozkłada się względnie równomiernie na obwodzie elementu, gdzie jego sztywność jest największa. Znacznie bardziej niekorzystnym przypadkiem jest ssanie wiatru, w tym przypadku obciążenia przenoszone są przez punkty mocowania. Zmienny charakter oddziaływania wiatru może prowadzić do zjawisk zmęczeniowych, a w konsekwencji do uszkodzeń łączników oraz elementów podkonstrukcji. Istotnym zjawiskiem towarzyszącym pracy elewacji wentylowanej jest tzw. efekt kominowy. Przepływ powietrza w szczelinie wentylacyjnej, wywołany różnicą temperatur i ciśnień, powoduje powstawanie dodatkowego gradientu ciśnienia. Może to generować drgania oraz dodatkowe naprężenia w elementach systemu, prowadząc w dłuższym okresie do luzowania połączeń i obniżenia trwałości układu. W takich przypadkach konieczne jest odpowiednie projektowanie liczby oraz nośności łączników. Kolejną istotną grupę oddziaływań stanowią obciążenia termiczne. Zmiany temperatury powodują rozszerzalność i kurczliwość materiałów. W przypadku braku możliwości swobodnych odkształceń – wynikającego np. z niewłaściwego zaprojektowania dylatacji lub błędów montażowych – dochodzi do wzrostu naprężeń wewnętrznych oraz ich koncentracji w rejonach mocowań. Może to prowadzić do trwałych deformacji paneli, pogorszenia estetyki elewacji, a w skrajnych przypadkach również do uszkodzeń elementów systemu.

Szczególnym przypadkiem oddziaływań termicznych jest sytuacja pożarowa, w której wysokie temperatury oraz intensywny przepływ powietrza w szczelinie wentylacyjnej mogą przyczynić się do szybkiej degradacji elementów konstrukcji. Wymaga to odpowiedniego doboru materiałów oraz spełnienia wymagań w zakresie odporności ogniowej.

Do obciążeń środowiskowych należy również zaliczyć oblodzenie. Zjawisko to występuje najczęściej podczas opadów deszczu przy niskich temperaturach, gdy dochodzi do zamarzania wody na wychłodzonej powierzchni panelu. Powstała warstwa lodu zwiększa ciężar działający na system elewacyjny. Obciążenie śniegiem w przypadku elewacji pionowych jest zazwyczaj pomijalne. Jednak w przypadku elewacji nachylonych, o kącie mniejszym niż 60°, może dochodzić do akumulacji śniegu, co generuje dodatkowe obciążenia – zarówno równomierne, jak i lokalne. Wszystkie wymienione oddziaływania przenoszone są w sposób sekwencyjny: z panelu na podkonstrukcję – bezpośrednio przez docisk lub pośrednio za pośrednictwem łączników

– a następnie z rusztu na konstrukcję nośną ściany, do której system elewacyjny jest zamocowany.

## 6. Sposoby analizy obliczeniowej

Analiza pracy elewacji wentylowanych prowadzona jest na różnych poziomach szczegółowości. Na etapie koncepcji i projektowania globalnego oddziaływanie wiatru określa się najczęściej zgodnie z normami obciążeniowymi. W bardziej zaawansowanych przypadkach wykorzystuje się symulacje numeryczne przepływu powietrza (CFD), pozwalające na dokładniejsze odwzorowanie rozkładu ciśnień na powierzchni elewacji.

Projektowanie poszczególnych elementów systemu – w szczególności paneli elewacyjnych – wymaga jednak bardziej szczegółowej analizy. Ze względu na złożoną geometrię, obecność przetłoczeń, otworów oraz lokalnych usztywnień, metody analityczne często okazują się niewystarczające.

W takich przypadkach stosuje się metody numeryczne, w szczególności metodę elementów skończonych (MES), umożliwiającą analizę stanów naprężeń, odkształceń oraz pracy połączeń. Podejście to pozwala na bardziej precyzyjne odwzorowanie rzeczywistego zachowania elementów oraz identyfikację miejsc koncentracji naprężeń.

Zagadnienia te stanowią przedmiot dalszej analizy w artykule: Cwyl, M., Galemba, P., Konopka, M., Prochera M., Analiza numeryczna kasetonów elewacyjnych wykonanych z aluminium, stali lub stali kortenowskiej, poświęconym numerycznemu modelowaniu kasetonów elewacyjnych wykonanych z różnych materiałów.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] ETAG 034, Zestawy do wykonywania okładzin ścian zewnętrznych, cz. 1 i 2, EOTA, 2012
- [2] EAD 090062-00-0404, Kits for external wall claddings mechanically fixed, EOTA, 2018
- [3] PN-EN 1993 (seria): Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych
- [4] PN-EN 1999 (seria): Eurokod 9: Projektowanie konstrukcji aluminiowych
- [5] PN-EN 1090 (seria): Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych
- [6] PN-EN 14782: Samonośne blachy metalowe do pokryć dachowych, okładzin zewnętrznych i wewnętrznych – Charakterystyka wyrobu i wymagania
- [7] PN-EN ISO 3506 (seria): Części złączne odporne na korozję ze stali nierdzewnej – Własności mechaniczne i fizyczne
- [8] Kopyłow O., Elewacje wentylowane – problemy wykonania i odbioru, *Budownictwo i Architektura* 15, 2/2016, str. 51–56
- [9] Kopyłow O., Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych. Część B: Roboty wykończeniowe, zeszyt 14: Elewacje wentylowane, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2021
- [10] Runkiewicz L., Kopyłow O., Sieczkowski J., Elewacje wentylowane. Diagnostyka stanu technicznego, seria: Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2021
- [11] Zawiślak Ł., Identyfikacja modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru, Wrocław, 2023
- [12] Kopyłow O., Zanim powstanie elewacja wentylowana, *Inżynier Budownictwa* 1/2016
- [13] Błaszczyński T. Z., Współczesne elewacje. Elewacje wentylowane, *Builder* 2/2015 str. 76–79
- [14] Schabowicz K., Elewacje wentylowane. Technologia produkcji i metody badania płyt włóknisto-cementowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2018
- [15] Żniński W., Elewacje wentylowane, *Buduj z głową* 4/2018

# Wielka płyta – od innowacji do wyzwania – badania termowizyjne

## Large-panel buildings – from innovation to challenge – thermal imaging research

dr hab. inż. Szymon Firląg, prof. uczelni (ORCID: 0000-0002-6276-3666), Iga Błaszkiwicz, Bartłomiej Szulc, studenci, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7444

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia wyniki badań termowizyjnych przeprowadzonych w ramach projektu pt. „Modelowa modernizacja budynków z wielkiej płyty”. Jego celem jest opracowanie kompleksowego procesu służącego poprawie efektywności energetycznej oraz jakości życia w budynkach z wielkiej płyty. Badania te mają wskazać miejsca kluczowe dla ochrony cieplnej budynku.

**Słowa kluczowe:** wielka płyta, badania termowizyjne, Wk-70.

**Abstract:** This article presents the results of thermographic studies carried out as part of the project entitled „Model Modernization of Large-Panel Buildings”. Its aim is to develop a comprehensive process for improving energy efficiency and the quality of life in large-panel buildings. These studies are intended to identify the areas that are critical to the building’s thermal protection.

**Keywords:** large-panel, thermographic examinations, Wk-70.

### 1. Wprowadzenie

W wyniku zniszczeń materialnych po II wojnie światowej i wysokiego wzrostu liczby urodzeń, zwłaszcza w latach 50. ubiegłego wieku, powstała pilna potrzeba zwiększenia liczby mieszkań. W Europie Zachodniej jeszcze przed wybuchem wojny zaczęło rozwijać się budownictwo prefabrykowane, które dawało możliwość na szybsze postawienie budynku przy mniejszym zapotrzebowaniu na siłę roboczą. Trend ten po wojnie pojawił się w Polsce, czego skutkiem były liczne osiedla wykonane w tej właśnie technologii. Budynki te charakteryzują się dobrą jakością projektami (15% awarii było spowodowane błędami projektowymi), niestety nie są wysokiej jakości wykonania (60% awarii spowodowane błędami wykonawczymi) [1]. Biorąc pod uwagę aktualną sytuację mieszkaniową w Polsce, wyburzenie tych budynków nie może być brane pod uwagę. Dlatego termomodernizacja powinna być poparta szczegółową analizą budynku, sprawdzeniem jego parametrów, a także opracowaniem schematu działań. Zagadnienie to stało się przedmiotem współpracy Koła Naukowego Inżynierów Nowej Generacji działającego na Politechnice Warszawskiej z Biurem Ochrony Powietrza i Polityki Klimatycznej oraz Zakładem Gospodarowania Nieruchomościami w Dzielnicy Praga-Południe. Projekt „Modułowej modernizacji budynków z wielkiej płyty” ma wpisywać się w zmiany dyrektywy o charakterystyce energetycznej budynków EPBD w ramach „Fit for 55”, który zakłada zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej o co najmniej 55% do 2030 roku, by wytyczyć ścieżkę do neutralności klimatycznej w 2050 roku. W tym celu

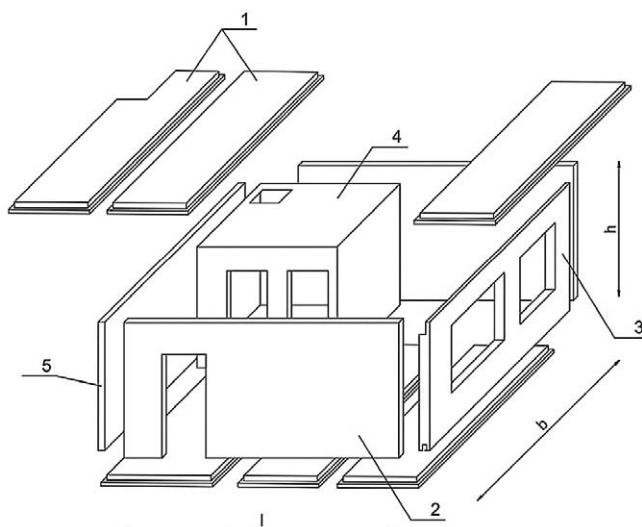
wszystkie nowe budynki od 2030 roku mają być bezemisyjne (a będące własnością publiczną od 2028 roku), a dostosowanie wszystkich istniejących budynków ma być wykonane do 2050 roku [2]. Z racji, że mieszkania w budynkach z wielkiej płyty w roku 2018 stanowiły około 20% zasobów mieszkalnych w Polsce [3] opracowanie kompleksowego planu modernizacji będzie dużym krokiem dla ułatwienia i przyspieszenia tego procesu.

### 2. Dane techniczne budynków z wielkiej płyty

Główną ideą prefabrykacji jest „złożenie” budynku z elementów przygotowanych wcześniej w fabryce. Stworzono systemy wielkopłytowe, według których projektowano budynki mieszkalne, głównie wielorodzinne. Każdy system miał swój moduł ścienny (charakteryzujący się wysokością, szerokością, grubością i rodzajem warstw) oraz metody łączenia ich ze sobą. Stropami były głównie kanałowe płyty typu Żerań. Głównymi systemami stosowanymi w Polsce był system OWT, W-70, Wk-70, Szczecin i WUF-T [3].

Analizowany w artykule budynek wielorodzinny wykonany był w systemie Wk-70. Jest to system z elementami przyjętymi z systemu W-70, przy zastosowaniu częściowych modyfikacji (np. zwiększenie wysokości modułu oraz wprowadzenie wieńca stropowego). Układem konstrukcyjnym tego systemu wielkopłytowego jest układ poprzeczny [4].

Pokazane na rysunku 1 wymiary są wymiarami modułowymi, tj. wymiar  $l$  przyjmuje wartości od 120 do 600 cm co 60 cm, wymiar  $b$  wartości 240 cm, 300 cm, 360 cm, 480 cm i 600 cm, natomiast wysokość ciany  $h$  wynosiła 280 cm lub 330 cm [3, 4].



**Rys. 1** Układ konstrukcyjny systemu Wk-70, 1) płyty stropowe, 2) ściana wewnętrzna, 3) ściana zewnętrzna, 4) kabina sanitarna, 5) ściana wewnętrzna [6]

Analizowany budynek ma jedenaście kondygnacji nadziemnych i jedną kondygnację podziemną. Ma jedną klatkę schodową. Wokół budynku są dobudowane pomieszczenia użytkowe. Niektóre z tych lokali nie są wykorzystywane. Występują ściany zewnętrzne osłonowe o grubości 20 cm (warstwa wewnętrzna nośna 8 cm, warstwa izolacyjna ze styropianu 6 cm, żelbetowa warstwa zewnętrzna 6 cm) oraz ściany zewnętrzne nośne o grubości 27 cm (warstwa wewnętrzna nośna 15 cm, warstwa izolacyjna ze styropianu 6 cm, żelbetowa warstwa zewnętrzna 6 cm) [3, 4]. W programie THERM 7.4 został obliczony współczynnik przenikania ciepła  $U$  dla ściany zewnętrznej nośnej i wynosi  $0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$ , a dla ściany zewnętrznej osłonowej  $0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Strop między kondygnacjami jest płytą kanałową typu Żerań, o grubości 16 cm. Na klatce schodowej występuje płyta żelbetowa o grubość 15 cm. Dach jest dachem wklęsłym, pokryty papą.

Loggie są wykonane w formie żelbetowych płyt wspornikowych wypuszczonych z wieńca. Balustrady loggii ażurowe o konstrukcji stalowej.

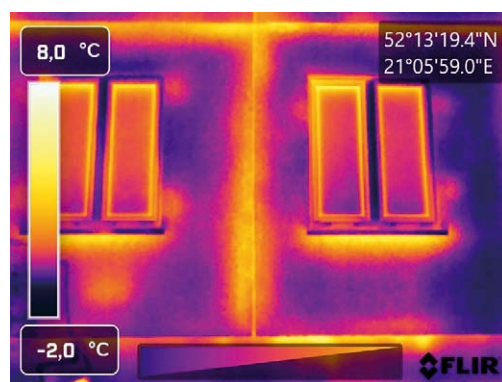
### 3. Badanie kamerą termowizyjną budynku z wielkiej płyty

Warunki wymagane do przeprowadzenia badań są opisane w normie „PN-EN ISO 6781-1:2024-02 Właściwości użytkowe budynków – Wykrywanie cieplnych, powietrznych i wilgotnościowych nieprawidłowości w budynkach metodą podczerwieni – Część 1: Procedury ogólne”. Poniżej zostały przedstawione zdjęcia wykonane kamerą termowizyjną Flir E-76. Podczas przeprowadzania badań temperatura wahała się w przedziale od  $0,8^\circ\text{C}$  (6:00) do  $0,6^\circ\text{C}$  (7:00). W ciągu 24 godzin poprzedzających badanie odnotowano temperaturę minimalną  $-0,7^\circ\text{C}$  oraz maksymalną równą  $5,8^\circ\text{C}$ ,

co oznacza, że wahania nie przekraczały zalecanego zakresu  $\pm 10 \text{ K}$ . W trakcie badania prędkość wiatru wynosiła około  $2,2 \text{ km/h}$ , kierunek wiatru był zmienny. Wilgotność względna wynosiła około 97%.

#### 3.1. Elewacja

Analizując poszczególne fragmenty elewacji na podstawie rysunku 2, 3 i 4, można zauważyć podwyższone wartości temperatury w rejonie obramowań okiennych oraz na połączeniach płyt prefabrykowanych, co wskazuje na występowanie liniowych mostków cieplnych. Na rysunku 2 widoczne jest w strefie podparapetowej lokalne podwyższenie temperatury, które może świadczyć o obecności nieszczel-



**Rys. 2.** Zdjęcie termowizyjne strefy przyokiennej elewacji wschodniej

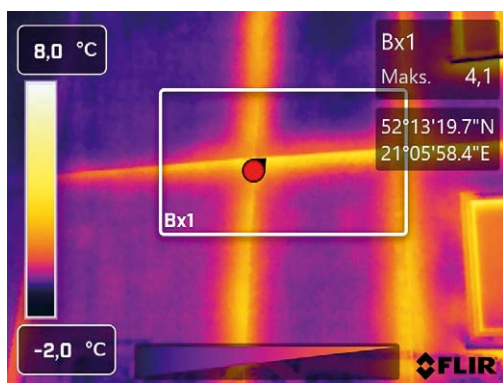
ności lub braku izolacji w przegrodzie. Po prawej stronie elewacji zaobserwowano nieregularną strefę obniżonej temperatury, mogącą być efektem zawilgocenia materiału lub infiltracji zimnego powietrza, prowadzącej do lokalnego pogorszenia właściwości termoizolacyjnych przegrody. Rysunek 3 przedstawia szerszy fragment elewacji, na którym widoczne są w podczerwieni strefy strat ciepła w miejscach połączeń płyt prefabrykowanych, potwierdzają-



**Rys. 3.** Zdjęcie termowizyjne elewacji południowej

jące obecność mostków cieplnych. Na rysunku 4 widoczny jest wyraźny, krzyżujący się układ liniowych mostków cieplnych, odpowiadający przebiegowi połączeń elementów prefabrykowanych. Podwyższone wartości temperatury w tych miejscach mogą wskazywać na nieciągłość izolacji termicznej lub jej lokalne osłabienie w obrębie złączy elementów wielkopłytowych.

**Rys. 4.**  
Zdjęcie termowizyjne połączeń płyt



### 3.2. Cokół budynku

Na rysunkach 5 i 6 zauważalne jest podwyższenie temperatury w strefie cokołowej (ściany piwnicy nieogrzewanej), co wskazuje na zwiększone straty ciepła wynikające z braku lub niewystarczającej izolacji termicznej. Na rysunku 5 w górnym obszarze

**Rys. 5**  
Zdjęcie termowizyjne cokołu na elewacji wschodniej



rze (Bx1) zaobserwowano podwyższone wartości temperatury w strefie cokołowej, co może wynikać z nieciągłości izolacji termicznej, jej niewystarczającej grubości lub błędów wykonaw-

**Rys. 6.**  
Zdjęcie termowizyjne cokołu na elewacji wschodniej



czych w obrębie styku ściany fundamentowej z elewacją. W obszarze (Bx2), zlokalizowanym na styku z gruntem widoczne są podwyższone wartości temperatury, co świadczy o zwiększonych stratach ciepła oraz może wskazywać na brak lub znaczne osłabienie izolacji termicznej w strefie fundamentowej.

### 3.3. Połączenie budynki z lokalami użytkowymi

Dodatkowo analiza termowizyjna umożliwiła identyfikację

**Rys. 7.**  
Zdjęcie termowizyjne połączenia budynku z wielkimi płytami z budynkiem w technologii tradycyjnej



**Rys. 8.**  
Zdjęcie termowizyjne strefy balkonowej elewacji południowej



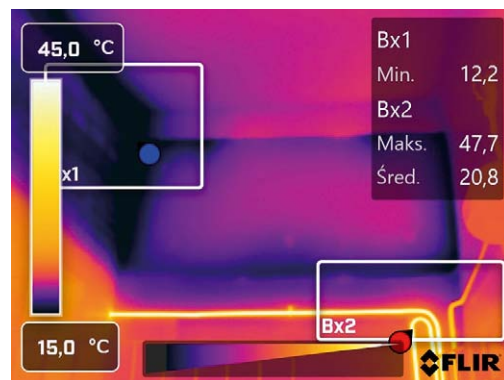
różnic materiałowych w obrębie przegrody. Po prawej stronie rysunku 7 oraz w obrębie ściany loggii na rysunku 8 widoczny jest fragment muru, w którym straty ciepła uwiadcniają się wzdłuż przebiegu spoin.

Dodatkowo analiza termowizyjna umożliwiła identyfikację różnic materiałowych w obrębie przegrody. Po prawej stronie rysunku 7 oraz w obrębie ściany loggii na rysunku 8 widoczny jest fragment muru, w którym straty ciepła uwiadcniają się wzdłuż przebiegu spoin. Zjawisko to wynika z różnic w przewodności cieplnej pomiędzy zaprawą a materiałem mурowym, co prowadzi do powstawania liniowych mostków cieplnych. Wskazuje również na fakt wykonania tych części budynku w technologii mурowej a nie prefabrykowanej. Dodatkowo na rysunku 7 widać znacznej wielkości pęknięcie muru.

### 3.4. Klatka schodowa

Analizując rysunek 9, można zauważyć znaczne zróżnicowanie rozkładu temperatury w obrębie przegrody. W górnym

**Rys. 9.**  
Zdjęcie termowizyjne klatki schodowej na ostatniej kondygnacji



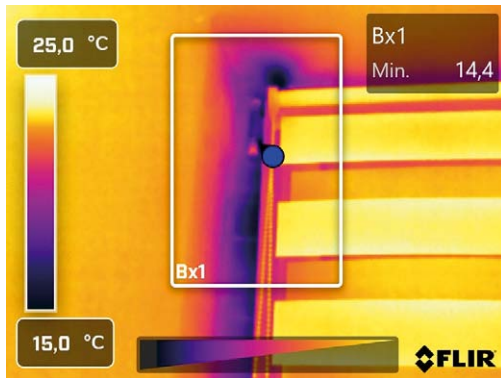
obszarze (Bx1) widoczne są znacznie obniżone wartości temperatury, co wskazuje na lokalne wychłodzenie powierzchni. W obszarze (Bx2) zauważalny jest brak izolacji instalacji, co prowadzi do znacznych strat ciepła w systemie centralnego ogrzewania.

#### 4. Badanie termowizyjne przy badaniu szczelności

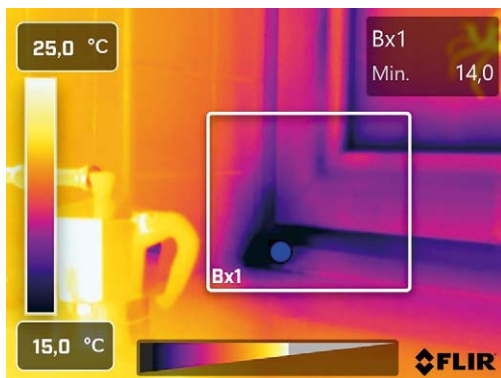
W ramach projektu zostało przeprowadzone również badanie szczelności powietrznej obudowy budynku, podczas którego kamerą termowizyjną szukano miejsc odbywania się infiltracji powietrza w jednym z mieszkań.

Na rysunkach 10–12 widoczna jest stolarka okienna oraz jej połączenie ze ścianą zewnętrzną. W rejonie naroży i krawędzi ościeżnicy zaobserwowano obniżone wartości temperatury, co wskazuje na nieuszczelnienie oraz infiltrację zimnego powietrza do wnętrza pomieszczenia.

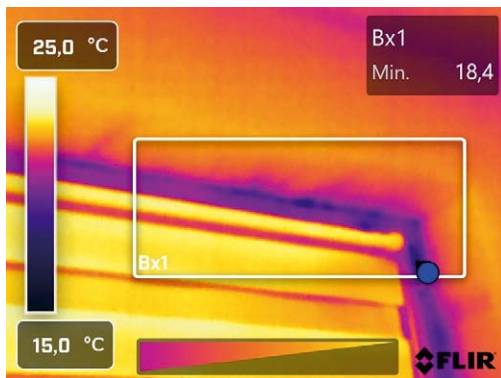
**Rys. 10.**  
Zdjęcie termowizyjne górnego naroża ościeżnicy okiennej wewnątrz budynku



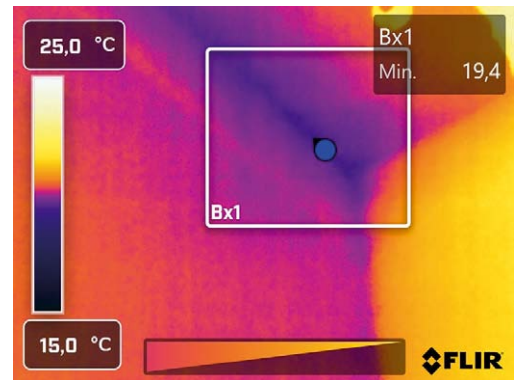
**Rys. 11.**  
Zdjęcie termowizyjne dolnego narożnika okna wewnątrz budynku



**Rys. 12.**  
Zdjęcie termowizyjne górnej części ościeżnicy okiennej wewnątrz budynku



**Rys. 13.**  
Zdjęcie termowizyjne połączenia ściany ze stropem wewnątrz budynku



Na rysunku 13 widoczne jest połączenie ściany ze stropem, gdzie również występuje lokalne wychłodzenie przegrody. Zjawisko to może świadczyć o obecności mostka cieplnego lub nieuszczelnienia w tej strefie.

#### 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badanie termowizyjne umożliwia precyzyjną identyfikację miejsc występowania strat ciepła oraz potencjalnych błędów wykonawczych, stanowiąc istotną podstawę do zaplanowania skutecznej termomodernizacji. Dzięki temu w dalszych pracach możliwe jest ukierunkowanie działań na problematyczne obszary, a co następnie przełoży się na ograniczenie strat ciepła, poprawę efektywności energetycznej budynku, a w konsekwencji obniżenie kosztów eksploatacyjnych oraz zwiększenie komfortu użytkownika.

Pamiętać należy, że problemy z mostkami cieplnymi nie kończą się jedynie na stratach ciepłych. Obniżona temperatura na ich powierzchni może przyczynić się do kondensacji pary wodnej, osiadania kurzu, a także rozwoju szkodliwych dla zdrowia mikroorganizmów w pomieszczeniach o nieefektywnie działającym systemie wentylacji.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Ostańska A., Wielka płyta. Analiza skuteczności podwyższania efektywności energetycznej. 1., Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2016
- [2] Directive of the European Parliament and of the council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings
- [3] Szulc J., Diagnostowanie techniczne budynków wzniesionych w technologiach uprzemysłowionych, Systemy wielkopłytowe, Warszawa, Rada programowa wydawnictw ITB, 2018
- [4] Sieczkowski J., Nejman T., Ustroje Budowlane, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1989
- [5] Firląg Sz., Miszczuk A., Działanie wentylacji grawitacyjnej w ocenie mieszkańców, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 2017
- [6] Kaliszuk-Wietecha A., Budownictwo Zrównoważone. Wybrane zagadnienia z fizyki budowlanej. 1. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017
- [7] PN-EN ISO 6781-1:2024-02 Właściwości użytkowe budynków – Wykrywanie cieplnych, powietrznych i wilgotnościowych nieprawidłowości w budynkach metodą podczerwieni – Część 1: Procedury ogólne

# Wpływ średnicy i ilości dozowania włókien polimerowych na wczesny skurcz zapraw cementowych

Influence of polymer fiber diameter and dosage amount of polymer fiber on early-age shrinkage of cement mortars

inż. Karolina Iwańska (ORCID: 0009-0007-8043-8270), dr hab. inż. Adam Zieliński, prof. ZUT (ORCID: 0000-0001-7949-1831), Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7445

**Streszczenie:** Celem artykułu jest analiza wpływu średnicy i ilości dozowania włókien polipropylenowych na skurcz zapraw cementowych. W badaniach laboratoryjnych zastosowano mikrowłókna o średnicy 18 oraz 34  $\mu\text{m}$ , o długości 6 mm. Producent zaleca dozowanie w ilości od 0,3 do 2  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Na potrzeby badań przyjęto dwie wartości dozowania – minimalną 0,3  $\text{kg}/\text{m}^3$  oraz optymalną 0,9  $\text{kg}/\text{m}^3$  [1], dla obu rodzajów mikrowłókien. Badania wczesnych odkształceń skurczowych: autogenicznego i przez wysychanie, wykonano metodą PST (*Plastic Sleeve Tes/Polish Shrinkage Test*) [2]. Analiza badawcza wykazała, że dodatek analizowanych włókien polipropylenowych (PP) do zapraw cementowych wpływa na redukcję wczesnego skurczu całkowitego, lecz nie ma istotnego wpływu na rozwój skurczu autogenicznego po 28 dniach. Oznacza to, że obecność włókien PP przyczynia się do zmniejszenia wczesnego skurczu spowodowanego wysychaniem.

**Słowa kluczowe:** skurcz od wysychania, skurcz autogeniczny, mikrowłókna polipropylenowe, zaprawa cementowa.

**Abstract:** The purpose of this article is to analyze the effect of the diameter and dosage amount of polypropylene fibers on the shrinkage of cement mortars. In laboratory tests, microfibers with a diameter of 18 and 34  $\mu\text{m}$  with a length of 6 mm were used. The manufacturer recommends a dosage of 0,3 to 2  $\text{kg}/\text{m}^3$ . For the purposes of the study, two dosage values were adopted – a minimum of 0,3  $\text{kg}/\text{m}^3$  and an optimum of 0,9  $\text{kg}/\text{m}^3$  [1], for both types of microfibers. Early shrinkage deformation tests: autogenous and by drying, were performed using the Plastic Sleeve Tes/Polish Shrinkage Test (PST) [2]. The research analysis showed that the addition of the analyzed polypropylene (PP) fibers to cement mortars affects the reduction of early total shrinkage, but has no significant effect on the development of autogenous shrinkage after 28 days. This means that the presence of PP fibers contributes to reducing early shrinkage caused by drying.

**Keywords:** shrinkage from drying, autogenous shrinkage, polypropylene microfibers, cement mortar.

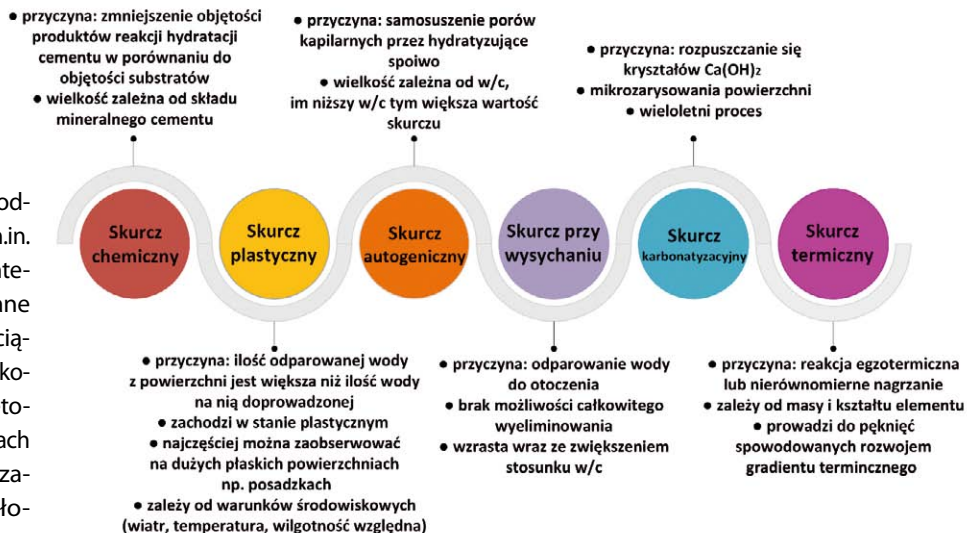
## 1. Wprowadzenie

Zrozumienie rodzajów skurczu (rys. 1) jest kluczowe dla minimalizacji jego negatywnych skutków oraz poprawy jakości konstrukcji betonowych.

Skurcz przy wysychaniu to proces, który występuje w wyniku odparowywania wody do otoczenia, w którym wilgotność względna powietrza jest niższa niż 100% [3]. W czasie procesu twardnienia stopniowo wydziela się para wodna. Zjawisko to ma charakter częściowo odwracalny – ponowne nawilżenie w początkowym okresie dojrzewania betonu może znacząco ograniczyć powstawanie rys skurczowych. Niemniej jednak, całkowite wyeliminowanie skurczu przy wysychaniu jest niemożliwe ze względu na postępujący proces hydratacji, który skutkuje domknięciem struktury porowatej cementu i ograniczeniem zdolności do absorpcji wody [4]. Skurcz przy wysychaniu jest dominującym typem skurczu w betonach zwykłych (rys. 2) [5]. Jego intensywność zależy od szeregu czynników technologicznych, takich jak: stopień rozdrobnienia cementu, rodzaj i uziarnienie kruszywa, stosunek woda/spoiwo (w/s), wilgotność powietrza, obecność

domieszek chemicznych, czy chociażby wielkość betonowanego elementu [6]. Skurcz autogeniczny następuje na skutek pobierania wody z porów kapilarnych przez ziarna hydratyzującego cementu. W przeciwieństwie do skurczu wysychania, skurcz autogeniczny nie jest wywołany wymianą wilgoci z otoczeniem, lecz przez zachodzące wewnątrz reakcje chemiczne spoiwa, które absorbują wodę zarobową i generują samosuszenie. Woda zarobowa, zużywana w trakcie hydratacji, prowadzi do zwiększania promieni menisków, a następnie napięć kapilarnych w matrycy cementowej [8]. Intensywność tego procesu zależy od stopnia deficytu wody niezbędnej do prawidłowego przebiegu reakcji chemicznych w matrycy cementowej [4]. Skurcz autogeniczny zachodzi w warunkach izotermicznych, czyli nie uwzględnia zmiany objętości spowodowanej utratą lub przenikaniem substancji, fluktuacjami temperatury czy działaniem zewnętrznej siły [9]. Zjawisko to jest szczególnie wyraźne przy niskim współczynniku w/c oraz w betonach wysokiej wytrzymałości [7]. Ze względu na jego nieodłączne i nieuniknione występowanie, skurcz autogeniczny wymaga starannego uwzględnienia na etapie projektowania konstrukcji, aby złagodzić jego potencjalne

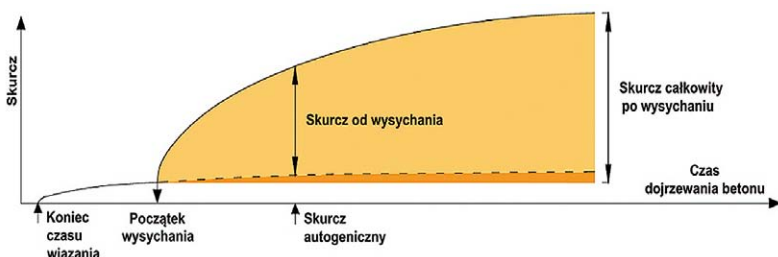
**Rys. 1.** Schemat rodzajów odkształceń skurczowych



niekorzystne skutki.

Aby ograniczyć negatywne skutki odkształceń skurczowych, stosuje się m.in. włókna polipropylenowe. Są to syntetyczne włókna chemiczne, używane głównie w postaci krótkiego, nieciągniętego i fibrylowanego materiału wykorzystywanego w produkcji fibrobetonu. Główną ich funkcją w kompozytach cementowych jest ograniczenie zarzysowania, poprawa wytrzymałości na rozciąganie, elastyczność oraz usprawnienie charakterystyki odkształceń kompozytu [1]. Polipropylen charakteryzuje się także doskonałą odpornością chemiczną [10], z wyjątkiem kontaktu z substancjami utleniającymi. Obecność włókien przyczynia się do zmniejszenia osiadania składników mieszanki oraz zjawiska wycieku wodnego z mieszanki betonowej tzw. bleedingu. Dla uzyskania optymalnych rezulta-

być prowadzony zarówno manualnie, jak i automatycznie, z wykorzystaniem zadanego interwału czasowego. W niniejszym artykule zaproponowano podejście pomiarowe w postaci metody PST (*Plastic Sleeve Test/Polish Shrinkage Test*), która rejestruje skurczowe deformacje autogeniczne i w wyniku wysychania [2].



**Rys. 2.** Wykres skurczu w betonie zwykłym według [7]

tów zalecana dawka włókien polipropylenowych wynosi około 0,9 kg/m<sup>3</sup>, co w przybliżeniu wynosi 0,1% objętości zarobu [1]. Włókno polipropylenowe charakteryzuje się również wyjątkowo niską gęstością, mniejszą niż 1 g/cm<sup>3</sup>, co czyni je najlżejszym spośród wszystkich włókien syntetycznych [10]. Do oceny skurczu w stanie stwardniałym wywołanego procesem wysychania wykorzystuje się metody oparte na dylatometrycznej rejestracji deformacji skurczowych. Pomiar deformacji może

**Tabela 1.** Dane techniczne włókien według [13, 14]

| Dane techniczne             | Włókna ProMicro        | Włókna Belmix                 |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Postać                      | Włókna proste, cięte   | Włókna okrągłe, proste, cięte |
| Barwa                       | Biała                  | Biała                         |
| Skład                       | Polipropylen           | Polipropylen                  |
| Gęstość względna            | 0,91 g/cm <sup>3</sup> | 0,91 g/cm <sup>3</sup>        |
| Temperatura topnienia       | >1600°C                | >160°C                        |
| Długość włókien             | 6 mm/12 mm             | 6 mm/12 mm/18 mm              |
| Średnica włókien            | 0,018 mm               | 0,034 mm                      |
| Wytrzymałość na rozciąganie | 350–400 MPa            | 350–390 MPa                   |

## 2. Badania laboratoryjne

### 2.1. Skład zapraw cementowych

W ramach badań przygotowano pięć serii zapraw cementowych: jedną referencyjną oraz cztery modyfikowane dodatkiem mikrowłókien polipropylenowych o długości 6 mm. Zastosowano włókna o średnicach 18 μm (ProMicro) oraz 34 μm (Belmix).

Charakterystykę materiałową włókien przedstawiono w tabeli 1. Włókna dozowano w ilościach 0,3 kg/m<sup>3</sup>, odpowiadającej minimalnej dawce zalecanej przez producenta, oraz 0,9 kg/m<sup>3</sup> [15]. Jako spoiwo wykorzystano cement portlandzki CEM I 42,5R, przy zachowaniu stałego stosunku woda/cement na poziomie 0,5. Wodę zarobową stanowiła woda wodociągowa spełniająca wymagania normy PN-EN 1008 [11]. Do przygotowania zapraw zastosowano kruszywo naturalne o uziarnieniu do 2 mm (piasek rzeczny). Przed użyciem piasek był suszony przez 24h w temperaturze 105°C. Piasek był przesiewany w celu kontroli stałości uziarnienia i ilości nadfrakcji. Skład badanych zapraw cementowych w stałej objętości 3,4 dm<sup>3</sup> potrzebnej do przeprowadzenia testów przedstawia tabela 2.

**Tabela 2.** Skład badanych zapraw

| Lp. | CEM I 42,5R | Woda     | Kruszywo | ProMicro 18 μm, 6mm | Belmix 34 μm, 6mm |
|-----|-------------|----------|----------|---------------------|-------------------|
| Z-R | 1,739 kg    | 0,870 kg | 5,218 kg |                     |                   |
| Z-1 | 1,739 kg    | 0,870 kg | 5,218 kg | 1,02 g              |                   |
| Z-2 | 1,739 kg    | 0,870 kg | 5,218 kg |                     | 1,02 g            |
| Z-3 | 1,739 kg    | 0,870 kg | 5,218 kg | 3,06 g              |                   |
| Z-4 | 1,739 kg    | 0,870 kg | 5,218 kg |                     | 3,06 g            |

## 2.2. Przebieg badań

Do formowania próbek zastosowano rękawy wykonane z polietylenu niskiej gęstości (LDPE) o grubości 0,1 mm i średnicy 40 mm, przycięte do długości 34 cm. Ich zastosowanie zabezpieczyło materiał testowy przed dyfuzją wilgotności z próbki do otoczenia oraz rozwojem temperatury w wyniku reakcji egzotermicznej spoiwa [2]. Dokonano pomiarów wagowych komponentów, co umożliwiło późniejsze określenie ubytku wody po 28 dniach, w kontekście skurczu przez wysychanie. Tak przygotowaną formę wypełniono zaprawą oraz ustawiono na stole wibracyjnym w celu odpowietrzenia próbki. Gotowe próbki umieszczono w aparaturze pomiarowej [2] (rys. 3). Pomiar deformacji skurczowych prowadzone były w odstępach pięciominutowych przy użyciu cyfrowych czujników zegarowych o rozdzielczości 2  $\mu\text{m}$ . Badania przeprowadzono w kontrolowanych warunkach środowiskowych, tj. w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotności względnej  $50 \pm 5\%$ . Dla każdego zarobu badawczego formowano 6 próbek, dla których po upływie 24 godzin z trzech próbek zdejmowano rękawy foliowe i ekspozowano na wysychanie. Próbki następnie kontrolnie ważono i ponownie umieszczono w aparaturze celem rejestracji deformacji całkowitych skurczowych. Kolejne trzy próbki pozostawiano w rękawach w celu dalszego pomiaru odkształceń wynikających ze skurczu autogenicznego.

Wartości liniowych odkształceń skurczowych obliczono według równania (1) [2]:

$$\varepsilon_{au}(t) = \frac{\Delta L(t)}{L_m(t)} \quad (\mu\text{m}/\text{m}) \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon_{au}$  – wartość odkształceń skurczowych w czasie  $t$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ),  
 $\Delta L$  – pomiar przemieszczenia próbki (mm),  
 $L_m$  – długość materiału próbki między trzpieniami (mm).

## 2.3. Wyniki i analiza

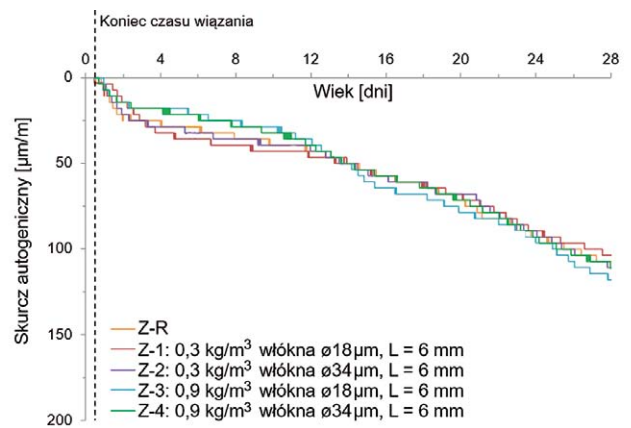
Badanie skurczu metodą PST zostało podzielone na dwie kategorie, w zależności od rodzaju skurczu: 1) zbadane: skurcz autogeniczny i skurcz całkowity oraz 2) obliczone: skurcz od wysychania, będący różnicą zmierzonego skurczu całkowitego do skurczu autogenicznego w funkcji czasu (rys. 4-6). Przedstawiony rozwój odkształceń skurczowych jest funkcją uśrednioną, wyznaczoną na podstawie uzyskanych danych pomiarowych. Należy podkreślić, że współczynnik kowariancji odkształceń we wszystkich badanych zaprawach nie przekroczył wartości 8%. Czas końca wiązania oznaczono z wykorzystaniem aparatu Vicata, ściśle według wytycznych zawartych w normie PN-EN 196-3 [16]. Analiza uwzględnia wpływ średnicy i ilości dozowanych włókien.



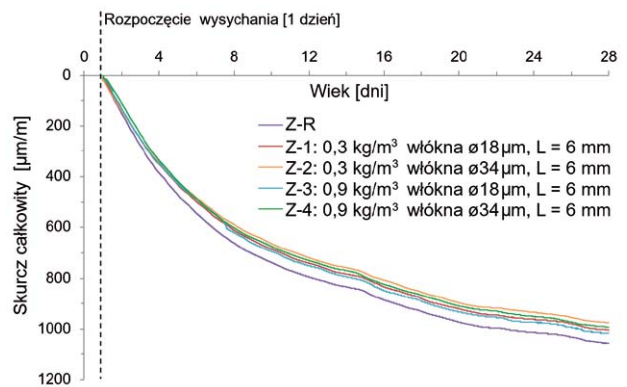
Rys. 3. Aparatura do pomiaru odkształceń skurczowych

Procentowy stosunek wielkości skurczu po 2, 7 i 28 dniach w porównaniu do prób referencyjnych przedstawiono w tabelach 3-5.

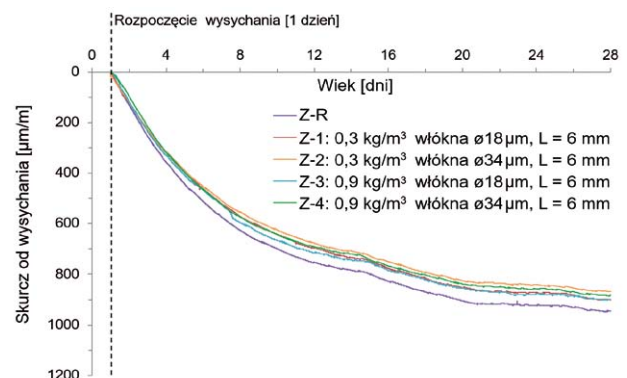
Po 2 dniach wykazano redukcję odkształceń, dla zapraw Z-1, Z-3, Z-4. Po 28 dniach wartości skurczu autogenicznego dla wszystkich badanych zapraw osiągnęły poziom porównywalny do próby referencyjnej (97-103% Z-R). W tych warunkach wpływ parametrów włókien PP (ilość, średnica) na rozwój skurczu po 28 dniach okazał się statystycznie nieistotny. Dla skurczu całkowitego (tab. 4) największą redukcję odnotowano w drugim dniu: mieszanka Z-4 osiągnęła 73% wartości



Rys. 4. Wpływ średnicy włókien na skurcz autogeniczny badanych zapraw



Rys. 5. Wpływ średnicy włókien na skurcz całkowity badanych zapraw



Rys. 6. Wpływ średnicy włókien na skurcz od wysychania badanych zapraw

**Tabela 3.** Procentowy stosunek wielkości skurczu autogenicznego względem zaprawy referencyjnej (Z-R)

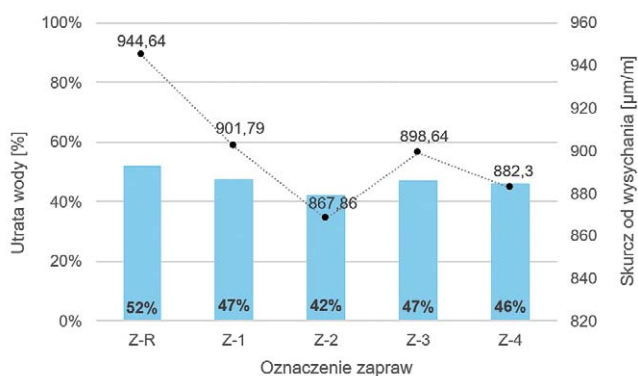
| Skurcz autogeniczny względem zaprawy referencyjnej (Z-R) |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|
| Wiek [dni]   | Z-1  | Z-2  | Z-3  | Z-4  |
| 2  | 57%  | 86%  | 57%  | 57%  |
| 7  | 122% | 111% | 78%  | 78%  |
| 28   | 97%  | 101% | 103% | 101% |

**Tabela 4.** Procentowy stosunek wielkości skurczu całkowitego względem zaprawy referencyjnej (Z-R)

| Skurcz całkowity względem zaprawy referencyjnej (Z-R) |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|
| Wiek [dni]  | Z-1 | Z-2 | Z-3 | Z-4 |
| 2   | 89% | 94% | 87% | 73% |
| 7   | 92% | 89% | 90% | 90% |
| 28  | 95% | 92% | 96% | 94% |

**Tabela 5.** Procentowy stosunek wielkości skurczu od wysychania względem zaprawy referencyjnej (Z-R)

| Skurcz od wysychania względem zaprawy referencyjnej (Z-R) |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|
| Wiek [dni]  | Z-1 | Z-2 | Z-3 | Z-4 |
| 2   | 93% | 90% | 90% | 74% |
| 7   | 91% | 89% | 91% | 91% |
| 28  | 94% | 91% | 94% | 92% |



**Rys. 7.** Analiza procentowej straty wody w odniesieniu do wielkości skurczu dla zapraw

Z-R (redukcja 27%). Po 28 dniach redukcja utrzymała się na poziomie 4–8%.

Analiza skurczu od wysychania (tab. 5) wykazała, że włókna ograniczyły odkształcenia. Największą redukcję skurczu (26%) zaobserwowano dla mieszanki Z-4 w drugim dniu. Po 28 dniach najmniejsze odkształcenia wystąpiły w mieszance Z-2, z redukcją wynoszącą 9%.

Dodatkowo na rysunku 7 przedstawiono, jak utrata wody wpływa na wielkość skurczu spowodowanego wysychaniem.

Mieszanka referencyjna (Z-R) wykazała najwyższą utratę wody (52%) i największy skurcz (944,64 µm/m). Największe odchylenie od tej wartości zaobserwowano w próbce Z-2, gdzie utrata wody wyniosła jedynie 42% (różnica: 10%), a skurcz był najniższy (867,86 µm/m). Najmniejsze odchylenia od wartości referencyjnej (po 5%) odnotowano dla zapraw Z-1 i Z-3 (utrata wody: 47%, skurcz: ~900 µm/m). Wyniki wskazują, że dodatek włókien

redukuje utratę wody i skurcz. Potwierdza to próbka Z-2, dla której odnotowano najniższe wartości tych parametrów. Ze względu na istotne różnice między próbkami (np. Z-4: 46% utraty wody, 882,3 µm/m skurczu) zaleca się dodatkowe pomiary dla weryfikacji reprezentatywności oraz potwierdzenia związku między utratą wody a skurczem.

### 3. Podsumowanie

Badania przeprowadzone metodą PST wykazały, że dodatek włókien polipropylenowych do zapraw cementowych nie wpływa w istotny sposób na ograniczenie skurczu autogenicznego. Choć w początkowych dniach obserwowano lokalne redukcje odkształceń, po 28 dniach wartości skurczu we wszystkich zaprawach z dodatkiem włókien były porównywalne z zaprawą referencyjną.

W przypadku skurczu od wysychania włókna PP wykazały wyraźny efekt ograniczający deformacje. Największe redukcje wystąpiły w początkowej fazie dojrzewania zaprawy (do 26%), jednak efekt ten utrzymywał się także po 28 dniach, osiągając do 9% w stosunku do próbki referencyjnej.

Skuteczność działania włókien była w większym stopniu uzależniona od ich dozowania niż od średnicy.

Zaleca się rozszerzenie zakresu badań o analizę wpływu długości włókien na efektywność redukcji skurczu, a także o pomiary skurczu plastycznego w fazie twardnienia zaprawy.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Madhavi T. C., Swamy Raju L., Mathur D., Polypropylene Fiber Reinforced Concrete- A Review, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014
- [2] Zieliński A., Schindler A. K., Plastic-sleeve test method to measure autogenous and drying shrinkage in paste, mortar, and concrete: Test Results, Measurement, 2024
- [3] Zieliński, A., Schindler, A.K. Measurement of autogenous and drying shrinkage in paste, mortar, and concrete with the plastic-sleeve test method. Mater Struct 58, 246 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02752-4>
- [4] Radlinska A., Rajabipour F., Bucher B., Henkensiefken R., Sant G., Weiss J., Shrinkage Mitigation Strategies in Cementitious Systems: A Closer Look at Differences in Sealed and Unsealed Behavior, Journal of the Transportation Research Board, 2008
- [5] Domagała L., Skurcz i pęcznienie lekkich betonów kruszywowych modyfikowanych fazą włóknistą, Czasopismo Techniczne, 2008
- [6] Zieliński A., Federowicz K., Kaszyńska M., Comparison of calculation models' estimates with actual measured autogenous shrinkage in High-Performance Cement Composites, MATEC Web of Conferences, 2018
- [7] Wong X., Huo L. U., Early-age shrinkage of HPC decks under different curing methods, Advanced Technology in Structural Engineering, 2000
- [8] Górażdże, Vademecum Technologa Betonu, 2016
- [9] Neville A. M., Properties of Concrete, Pearson Education Limited, 2012
- [10] Tazawa E., Konkurito N., Kyokai K., Autogenous Shrinkage of Concrete: Proceedings of the International Workshop, London: E & FN Spon, 1999
- [11] Ebewele R. O., [w:] Polymer Science and Technology, CRC Press, 2000
- [12] PN-B-06714-23:1984: Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie zmian objętościowych metodą Amslera
- [13] ASTM C 157: Standard Test Method for Length Change Of Hardened Cement Mortar And Concrete
- [14] Astra ProMicro – karta danych technicznych
- [15] Astra Belmix – karta danych technicznych
- [16] Madhavi T. C., Swamy Raju L., Mathur D., Polypropylene Fiber Reinforced Concrete- A Review, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2014
- [17] PN-EN 196-3: Metody badania cementu. Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości

# Obliczanie odkształceń i naprężeń w przekrojach żelbetowych w zakresie nieliniowego pełzania

Calculation of strain and stresses in reinforced concrete cross-sections taking into account the nonlinear creep

dr inż. Krzysztof Klempka (ORCID: 0000-0002-5144-6681), Wydział Geoinżynierii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, mgr inż. Kamil Gryziec

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7446

**Streszczenie:** W artykule omówiono prawo nieliniowego pełzania oraz metody obliczania odkształceń po czasie  $t$ . Stworzono program komputerowy do generowania odkształceń i naprężeń w mimośrodkowo ściskanych przekrojach elementów żelbetowych z uwzględnieniem pełzania. Zaimplementowano cztery metody oparte na nieliniowym prawie pełzania: krok po kroku (KK), efektywnego modułu (EM), średnich naprężeń (MS) i współczynnika wieku (WW). Dane wyjściowe obliczone przez program są wizualizowane za pomocą animowanego wykresu, a także tabeli wyników. Porównano wyniki obliczeń krzywizn w przekrojach otrzymane według różnych metod.

**Słowa kluczowe:** nieliniowe pełzanie betonu, konstrukcje żelbetowe, odkształcenia, naprężenia.

**Abstract:** The article discusses the law of nonlinear creep and the methods of calculating strain after time  $t$ . A computer program was developed to generate strain and stresses in eccentricity compressed sections of reinforced concrete elements, taking into account creep. Four methods based on the non-linear creep law were implemented: step by step (KK), effective modulus method (EM), mean stress method (MS) and age adjusted effective modulus method (WW). Output data calculated by the program are visualized with an animated graph as well as a table of results. The results of curvature calculations in sections obtained by different methods were compared.

**Keywords:** nonlinear creep of concrete, reinforced concrete, strain, stress.

## 1. Wprowadzenie

Od dłuższego czasu w zespole konstrukcji żelbetowych UWM w Olsztynie zajmujemy się analizą metod obliczania nośności smukłych słupów żelbetowych. Projektując takie słupy według Eurokodu 2 [1], można stosować metodę ogólną lub metody uproszczone uwzględniania efektów drugiego rzędu. W tych obliczeniach istotną rolę odgrywiają obciążenia długotrwałe, a tym samym pełzanie betonu. Wpływ zjawisk reologicznych uważa się za najmniej rozpoznany głównie ze względu na oczywiste trudności związane z prowadzeniem badań pod wpływem obciążeń długotrwałych. Dlatego w celu wykonania dokładniejszych analiz postanowiono rozważyć zagadnienie nośności słupów żelbetowych przede wszystkim w aspekcie pełzania betonu. Powstało wiele prac głównie poświęconych obliczaniu słupów pod obciążeniem nieprzekraczającym granicy liniowego pełzania [2–6]. Projektując słupy pod znacznym obciążeniem, może pojawić się konieczność uwzględnienia nieliniowego pełzania. Dlatego w pracy [7] zaproponowano modele numeryczne słupów żelbetowych uwzględniające taką możliwość. Pierwszy z modeli jest oparty na modyfikacji zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  dla betonu (zalecanej według Eurokodu 2 do nieliniowej analizy konstrukcji) przez wymnożenie odkształceń przez współczynnik  $(1 + \varphi(\infty, t_0))$ . Natomiast w drugim modelu zastosowano prawo pełzania według teorii „ageing coefficient” z modyfikacją współczynnika pełzania  $\varphi(\infty, t_0)$

(według wzoru (3.7) Eurokodu 2) do wartości  $\varphi_n(\infty, t_0)$ . W kolejnym etapie analiz planuje się opracowanie bardziej zaawansowanej metody. Jej istotną częścią będzie algorytm umożliwiający generowanie odkształceń i naprężeń w przekrojach żelbetowych obciążonych długotrwałe siłą ściskającą i momentem zginającym, który jest głównym tematem prezentowanej pracy.

W dalszej części artykułu przedstawiono prawo nieliniowego pełzania oraz uproszczone metody obliczania odkształceń po czasie  $t$ , następnie omówiono autorski program komputerowy do generowania odkształceń i naprężeń w mimośrodkowo ściskanych przekrojach oraz zaproponowano prawo konstytutywne dla betonu, które może być wykorzystane w dalszych analizach.

## 2. Prawo nieliniowego pełzania

Odształcenie w funkcji czasu  $t$  wyraża się wzorem (1) zamieszczonym w pracy [8]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + F[\sigma(t_0)]C(t, t_0) + \int_{t_0}^t \left\{ \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \frac{1}{E(\tau)} + \frac{dF[\sigma(\tau)]}{d\tau} C(t, \tau) \right\} d\tau \quad (1)$$

w którym:

$$C(t, \tau) = \frac{\varphi(t, \tau)}{E(\tau)} \quad (1a)$$

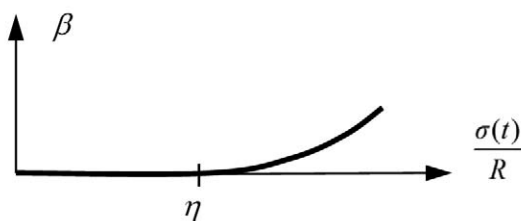
$\varphi(t, \tau)$  – współczynnik pełzania,  
 $E(\tau)$  – moduł sprężystości betonu w chwili  $\tau$ , (moduł odkształcenia chwilowego),  
 $\sigma(t_0)$  – naprężenie początkowe w czasie  $t_0$ ,  
 $E(t_0)$  – moduł sprężystości betonu w czasie  $t_0$ ,  
 $F[\sigma(t_0)]$  – wartość nieliniowej funkcji naprężeń w chwili  $t_0$ ,  
 $F[\sigma(t)]$  – nieliniowa funkcja naprężeń zależna od czasu  $t$ .

### 3. Nieliniowa funkcja naprężeń $F[\sigma(t)]$

W pracach różnych autorów [8–10] można znaleźć propozycje wyrażen opisujących nieliniową funkcję naprężeń  $F[\sigma(t)]$ . Do dalszych analiz wykorzystano prostą zależność przyjętą w książce Arutiuniana [8] opisaną związkami (2):

$$F[\sigma(t)] = \sigma(t) + \beta\sigma^2(t) \quad (2)$$

w którym współczynnik  $\beta$  jest funkcją naprężeń (rys. 1).



Rys. 1. Zależność współczynnika  $\beta$  od naprężeń  $\sigma(t)/R$

Mianem  $\beta$  jest  $1/\text{MPa}$ . Według [10] wartość  $\beta$  można wyznaczyć z zależności:

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{dla } \sigma(t) \leq \eta R \\ \nu \left[ \frac{\sigma(t)}{R} - \eta \right]^n & \text{dla } \sigma(t) > \eta R \end{cases} \quad (3)$$

w której:

$R$  – wytrzymałość betonu,

$\eta$  – stosunek wartości naprężenia, przy którym pełzanie liniowe przechodzi w nieliniowe do wytrzymałości betonu  $R$ ,  
 $\nu, n$  – parametry przyjmowane doświadczalnie.

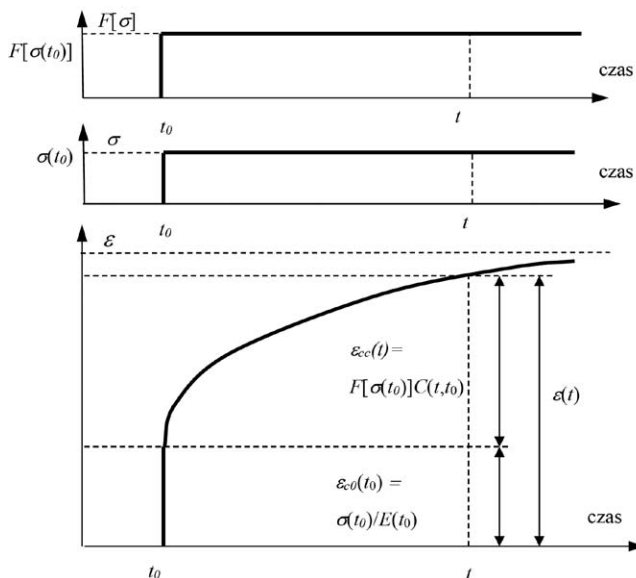
Stosując przepisy Eurokodu 2 jako granicę liniowego pełzania, przyjęto wartość naprężeń równą  $0,45f_{ck}$  ( $f_{ck}$  – wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie). Po uwzględnieniu tego założenia zależność (3) można zapisać w postaci:

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{dla } \sigma(t) \leq 0,45f_{ck} \\ \nu \left[ \frac{\sigma(t)}{f_{ck}} - 0,45 \right]^n & \text{dla } \sigma(t) > 0,45f_{ck} \end{cases} \quad (4)$$

Do dalszych analiz przyjęto wartości parametrów  $\nu = 0,15$  [ $1/\text{MPa}$ ] i  $n = 1,00$  według doświadczeń E. A. Jacenki opisanych w książce [10].

### 4. Odształcenie betonu przy stałym naprężeniu

Uwzględnia się pełzanie w czasie ( $t_0, t$ ). Zakłada się, że w wyniku osiowego ściskania naprężenia w betonie w chwili początkowej  $t_0$  wynoszą  $\sigma(t_0)$  i nie zmieniają się w czasie.



Rys. 2. Odkształcenia całkowite  $\epsilon(t)$  w chwili  $t$  przy stałych naprężeniach;  $\epsilon_{e0}(t_0)$  – odkształcenie sprężyste,  $\epsilon_{cc}(t)$  – odkształcenie powstałe w wyniku pełzania

Wartość funkcji naprężeń  $F[\sigma(t_0)]$  również jest stała w czasie (rys. 2). Odkształcenie w chwili  $t$  wyznacza się ze wzoru (1), który dla przypadku stałego naprężenia można zapisać w postaci wzoru (5):

$$\epsilon(t) = \epsilon_{e0}(t_0) + \epsilon_{cc}(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + F[\sigma(t_0)]C(t, t_0) \quad (5)$$

### 5. Odształcenie betonu przy zmiennym naprężeniu, gdy naprężenie jest dane funkcją czasu

Dokładne, numeryczne obliczenie odkształceń można wykonać, dzieląc rozpatrywany czas na krótkie przedziały i sumując kolejne przyrosty. Zakładając, że po czasie  $t_0$  następują zmiany naprężeń  $\Delta\sigma(t_i)$ , a tym samym przyrosty funkcji naprężeń  $\Delta F[\sigma(t_i)]$  w kolejnych przedziałach czasowych  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ , całkę we wzorze (1) po uwzględnieniu wzoru (1a) aproksymuje się sumą:

$$\int_{t_0}^t \left[ \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \cdot \frac{1}{E(\tau)} + \frac{dF[\sigma(\tau)]}{d\tau} \cdot \frac{\varphi(t, \tau)}{E(\tau)} \right] d\tau = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma(t_i)}{E(t_i)} + \Delta F[\sigma(t_i)] \cdot \frac{\varphi(t, t_i)}{E(t_i)} \quad (6)$$

lub stosując aproksymację trapezową całkę z (1) można przybliżyć wzorem (6a):

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma(t_i)}{2} \cdot \left( \frac{1}{E(t_i)} + \frac{1}{E(t_{i-1})} \right) + \Delta F[\sigma(t_i)] \cdot \frac{\frac{\varphi(t, t_i)}{E(t_i)} + \frac{\varphi(t, t_{i-1})}{E(t_{i-1})}}{2} \quad (6a)$$

Po uwzględnieniu związku (6) lub (6a) zależność (1) można zapisać odpowiednio w postaci wzoru (7) i (7a):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + F[\sigma(t_0)] \cdot \frac{\varphi(t, t_0)}{E(t_0)} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma(t_i)}{E(t_i)} + \Delta F[\sigma(t_i)] \cdot \frac{\varphi(t, t_i)}{E(t_i)} \quad (7)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + F[\sigma(t_0)] \cdot \frac{\varphi(t, t_0)}{E(t_0)} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma(t_i)}{2} \cdot \left( \frac{1}{E(t_i)} + \frac{1}{E(t_{i-1})} \right) + \Delta F[\sigma(t_i)] \cdot \frac{\frac{\varphi(t, t_i)}{E(t_i)} + \frac{\varphi(t, t_{i-1})}{E(t_{i-1})}}{2} \quad (7a)$$

Wzory te umożliwiają dokładne obliczenie odkształceń. Wzór (7a) został wykorzystany do obliczeń metodą „krok po kroku” (KK). Stosując inne sposoby aproksymacji całki we wzorze (1), wyróżnia się następujące uproszczone metody obliczania odkształceń w chwili  $t$ :

- Metoda efektywnego modułu (EM),
- Metoda średnich naprężeń (SN),
- Metoda współczynnika wieku (WW).

Dla przypadku liniowego pełzania analizę tych metod omówiono w pracy [11]. Dla nieliniowego pełzania, w oparciu o założenia przyjęte w tej pracy dla poszczególnych metod wyprowadzono wzory na odkształcenia betonu w chwili  $t$ , które przedstawiono poniżej.

### 5.1. Metoda efektywnego modułu (EM)

Przyjmując jeden przedział czasowy, stosując metodę prostokątów, całkę w zależności (1) można przybliżyć następującym wyrażeniem:

$$\int_{t_0}^t \left\{ \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \frac{1}{E(\tau)} + \frac{dF[\sigma(\tau)]}{d\tau} C(t, \tau) \right\} d\tau \cong (\sigma(t) - \sigma(t_0)) \frac{1}{E(t_0)} + (F[\sigma(t)] - F[\sigma(t_0)]) C(t, t_0) \quad (8)$$

Po uwzględnieniu (8) zależność (1) można zapisać w postaci wzoru (9):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t_0)} + F[\sigma(t)] C(t, t_0) \quad (9)$$

Podstawiając (10) i (11):

$$E(t_0) = E_{cm} \quad (10)$$

$$C(t, t_0) = \varphi(t, t_0) / E_{cm} \quad (11)$$

do (9) otrzymuje się zależność (12):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{cm}} + \frac{F[\sigma(t)]}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) \quad (12)$$

Podstawiając wyrażenie (2) do (12) otrzymuje się związek pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w betonie w chwili  $t$ :

$$\varepsilon(t) = \beta \frac{\sigma^2(t)}{E_{cm}} \varphi(t, t_0) + \frac{\sigma(t)}{E_{cm}} (\varphi(t, t_0) + 1) \quad (13)$$

Przy wzrastającym naprężeniu w czasie odkształcenia obliczone według wzoru (13) są z nadmiarem. Zastosowanie tej metody nie wymaga obliczenia wartości naprężeń początkowych  $\sigma(t_0)$ .

W przypadku liniowego pełzania nieliniowa funkcja naprężeń  $F[\sigma(t)]$  jest równa wartości  $\sigma(t)$ , a tym samym zależność (13) można zapisać w postaci powszechnie znanego wzoru:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{c,eff}} \quad (14)$$

w którym:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (15)$$

Metoda EM ze względu na swoją prostotę jest w Eurokodzie wykorzystywana do obliczania ugięć elementów zginanych. Jej stosowanie polega na zastąpieniu (we wzorach liniowej teorii żelbetu) modułu sprężystości betonu  $E_{cm}$  przez moduł efektywny  $E_{c,eff}$ .

### 5.2. Metoda średnich naprężeń (SN)

Przyjmując jeden przedział czasowy i stosując metodę trapezów, całkę we wzorze (1) przybliża się wyrażeniem:

$$\int_{t_0}^t \left\{ \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \frac{1}{E(\tau)} + \frac{dF[\sigma(\tau)]}{d\tau} C(t, \tau) \right\} d\tau \cong \frac{(\sigma(t) - \sigma(t_0))}{2} \left( \frac{1}{E(t)} + \frac{1}{E(t_0)} \right) + (F[\sigma(t)] - F[\sigma(t_0)]) \frac{C(t, t) + C(t, t_0)}{2} \quad (16)$$

Uwzględniając (16) zależność (1) można przedstawić w postaci:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + \frac{F[\sigma(t)] + F[\sigma(t_0)]}{2} C(t, t_0) + \frac{(\sigma(t) - \sigma(t_0))}{2} \left( \frac{1}{E(t)} + \frac{1}{E(t_0)} \right) \quad (17)$$

Dla przypadku liniowego pełzania ze związku (2) i (4) wynikają zależności (18) i (19):

$$F[\sigma(t)] = \sigma(t) \quad (18)$$

$$F[\sigma(t_0)] = \sigma(t_0) \quad (19)$$

Uwzględniając związek (18) i (19), zależność (17) można zapisać w postaci (20):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + \frac{\sigma(t) + \sigma(t_0)}{2} C(t, t_0) + \frac{(\sigma(t) - \sigma(t_0))}{2} \left( \frac{1}{E(t)} + \frac{1}{E(t_0)} \right) \quad (20)$$

Natomiast wykorzystując związek (10) i (11), zależność (20) można zapisać w postaci wzoru (21) wyprowadzonego w pracy [11]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{cm}} + \frac{\sigma(t) + \sigma(t_0)}{2E_{cm}} \varphi(t, t_0) \quad (21)$$

**5.3. Metoda współczynnika wieku (WW)**

Stosując jeden przedział czasowy oraz współczynnik wieku  $\chi$ , całkę we wzorze (1) można zastąpić następującym wyrażeniem:

$$\int_{t_0}^t \left\{ \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \frac{1}{E(\tau)} + \frac{dF[\sigma(\tau)]}{d\tau} C(t, \tau) \right\} d\tau \cong (\sigma(t) - \sigma(t_0)) \frac{1}{E(t_0)} + (F[\sigma(t)] - F[\sigma(t_0)]) \chi C(t, t_0) \quad (22)$$

Uwzględniając (22), zależność (1) można zapisać w postaci (23):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + F[\sigma(t_0)]C(t, t_0) + (\sigma(t) - \sigma(t_0)) \frac{1}{E(t_0)} + (F[\sigma(t)] - F[\sigma(t_0)]) \chi C(t, t_0) \quad (23)$$

Wykorzystując zależności (10), (11) oraz zależności (18) i (19) dla przypadku liniowego pełzania wzór (23) można przedstawić w postaci (24):

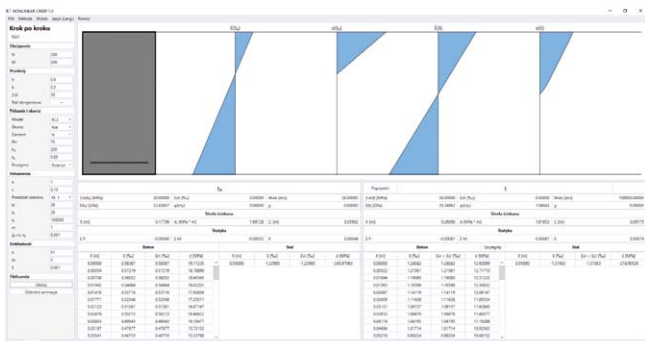
$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0) \left[ \frac{1}{E_{cm}} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{cm}} \right] + [\sigma(t) - \sigma(t_0)] \left[ \frac{1}{E_{cm}} + \chi \frac{\phi(t, t_0)}{E_{cm}} \right] \quad (24)$$

Na podstawie analiz zawartych w [11] dobre rezultaty zastosowania takiej teorii otrzymuje się w przypadkach, w których naprężenia nie zmieniają się zbyt szybko w czasie.

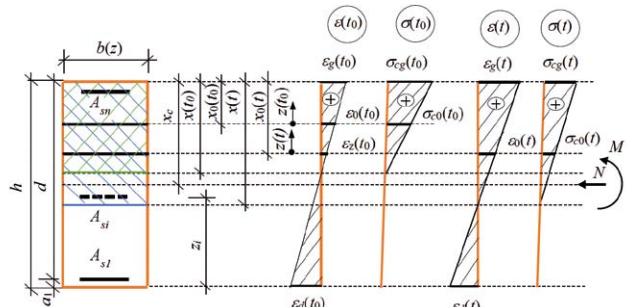
**6. Program komputerowy do wyznaczania odkształceń i naprężeń wywołanych pełzaniem w przekroju mimośrodowo ściskanym**

Wykorzystując omówione w p. 5 metody, opracowano program komputerowy do obliczania odkształceń i naprężeń w przekrojach mimośrodowo ściskanych (rys. 3). Poniżej opisano zasadę działania programu.

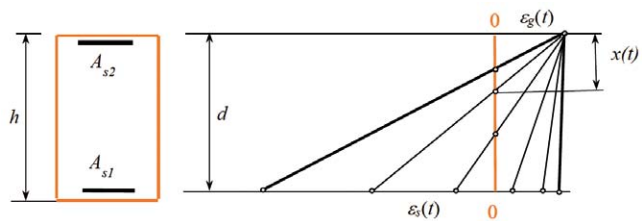
Rozpatruje się przekrój obciążony ściskającą siłą podłużną  $N$  i momentem zginającym  $M$  względem środka ciężkości przekroju betonu (rys. 4). Wartości odkształceń i naprężeń w chwili  $\tau = t_0$  ( $\varepsilon(t_0)$ ,  $\sigma(t_0)$ ) zostały wyznaczone według teorii liniowej. Siła i moment są stałe, tzn. nie zmieniają się w czasie – zmieniają się natomiast na skutek pełzania betonu odkształcenia i naprężenia. Dodatni moment  $M$  wywołuje



Rys. 3. Okno programu komputerowego



Rys. 4. Współrzędne, odkształcenia, naprężenia w przekroju przez rysę – w chwili  $\tau = 0$  i  $\tau = t$



Rys. 5. Odkształcenia w przekroju

rozciąganie dolnych włókien. Naprężenia ściskające i odpowiadające im skrócenia są dodatnie. Uwzględnia się pełzanie betonu w chwili  $\tau = t$ . Pełzanie betonu wywołuje przyrost krzywizny i redystrybucję sił wewnętrznych między betonem i zbrojeniem. Środek ciężkości przekroju betonu leży w odległości  $x_c$ , środek ciężkości przekroju sprowadzonego w chwili  $t$  leży w odległości  $x_0(t)$  od górnych włókien, a zasięg strefy ściskanej jest równy  $x(t)$ . W środku ciężkości przekroju sprowadzonego odkształcenie wynosi  $\varepsilon_0(t)$ , a naprężenie  $\sigma_0(t)$ . W układzie współrzędnych „ $z(t)$ ”, mającym początek na osi ciężkości przekroju, krzywizna w przekroju przez rysę w czasie  $t$  wynosi:

$$\kappa(t) = \frac{\varepsilon_g(t) - \varepsilon_s(t)}{d} \quad (25)$$

z zasady płaskich przekrojów można obliczyć odkształcenia w przekroju:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0(t) + \kappa(t)z(t), \quad (26)$$

a warunki równowagi można zapisać w postaci:

$$\int_{z_0}^h \sigma_c(\varepsilon) \cdot b(z) \cdot dz + \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{si}(\varepsilon) - N = 0 \quad (27)$$

$$\int_{z_0}^h \sigma_c(\varepsilon) \cdot b(z) \cdot z \cdot dz + \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \sigma_{si}(\varepsilon) \cdot z_i - N(h - x_c) - M = 0 \quad (28)$$

W celu znalezienia równowagi sił wewnętrznych w chwili  $\tau = t$  zakłada się przebieg odkształceń w przekroju (rys. 5). Następnie w poszczególnych włóknach strefy ściskanej betonu korzystając z odpowiedniej zależności na odkształcenia  $\varepsilon(t)$  (według p. 5 – wykorzystując prawo pełzania) oblicza się (metodą połowienia przedziału) naprężenia. Naprężenia w  $i$ -tej warstwie stali są funkcją odkształceń przekroju:

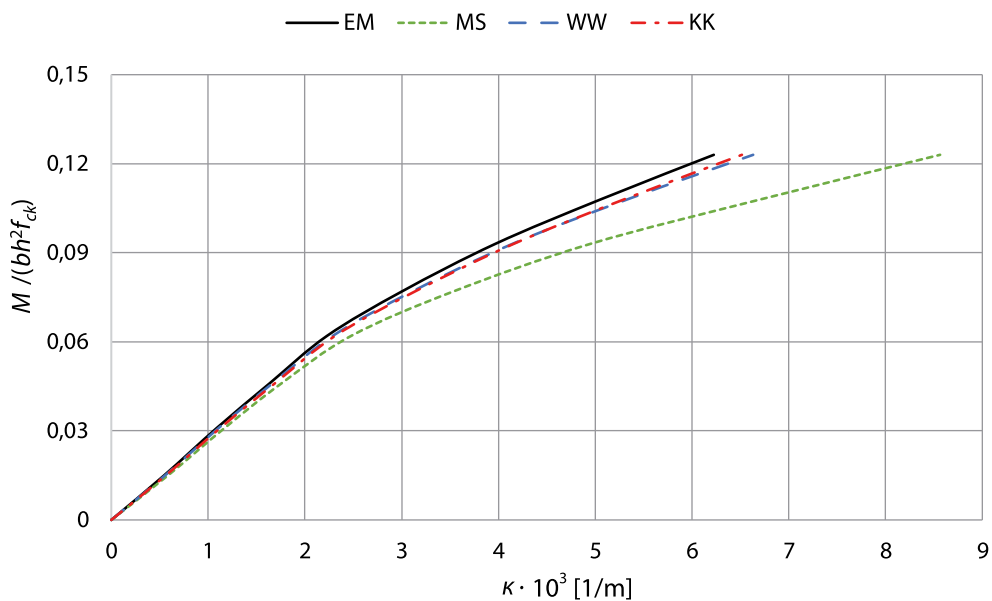
$$\sigma_{si}(\varepsilon) = \sigma_{si}(\varepsilon_g - \kappa(h - z_i))$$

Obliczone naprężenia w stali i w betonie wykorzystuje się do sprawdzenia równań równowagi (27) i (28), w których całki obliczane są numerycznie metodą Simpsona. Sprawdza się, z jaką dokładnością zostały osiągnięte warunki równowagi. Dla założonych odkształceń górnych  $\epsilon_g(t)$  zmienia się krzywiznę i ponownie sprawdza warunki równowagi. Następnie zakłada się nowe odkształcenie górne oraz krzywiznę i wykonuje serię obliczeń jak wyżej. W każdym kroku przy zadanym odkształceniu górnym zmienia się krzywiznę od wartości maksymalnej do minimalnej, za każdym razem sprawdzając warunki równowagi. Rozwiązaniem jest takie odkształcenie w górnym włóknie  $\epsilon_g(t)$  i krzywizna, przy których lewe strony w równaniach równowagi zbliżają się do zera z założoną dokładnością. W obliczeniach wykonywanych metodą krok po kroku taki cykl obliczeń należy wykonać w każdym przedziale czasowym przyjętego podziału czasu.

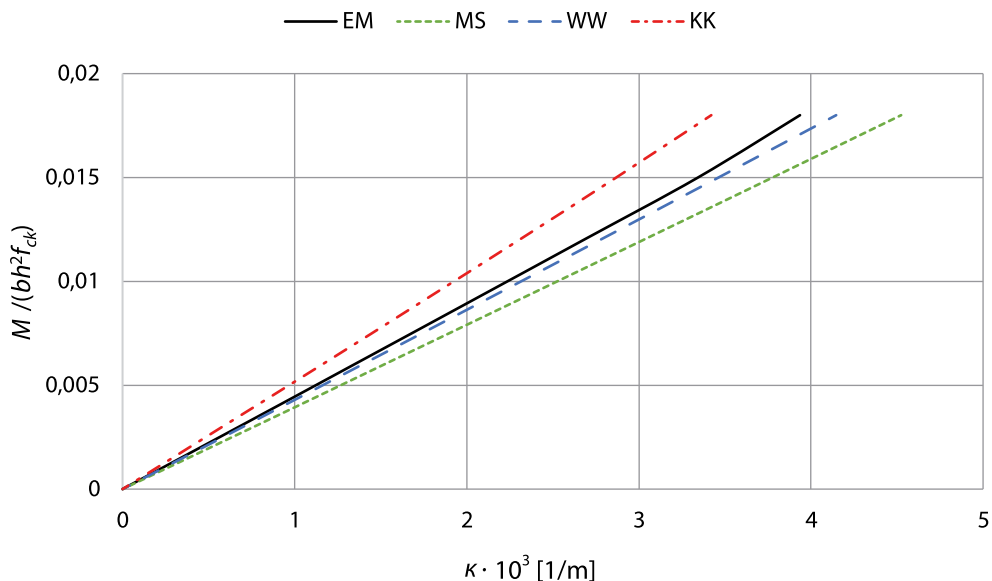
### 7. Porównanie wartości krzywizn $\kappa$ wyznaczonych metodami zastosowanymi w programie

W przyszłych analizach smukłych słupów żelbetowych istotnym elementem obliczeń będzie wyznaczenie zależności moment – krzywizna  $M-\kappa$ . Dlatego postanowiono porównać wartości krzywizn  $\kappa$  w przekrojach mimośrodkowo ściskanych wyznaczone różnymi metodami zastosowanymi w programie. Wykonano obliczenia dla wielu różnych przypadków. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wyniki dla wybranego przykładu przekroju prostokątnego o wymiarach  $h \times b = 0,6 \times 0,3$  m, wykonanego z betonu C30/35, zbrojonego symetrycznie stalą  $f_{yk} = 500$  MPa o  $A_{s1} = A_{s2} = 12,56$  cm<sup>2</sup>,  $a_1 = a_2 = 5$  cm. Obliczenia wykonano dla dwóch sił ściskających  $N = 0,2(bhf_{ck} + A_s f_{yk})$  oraz  $N = 0,8(bhf_{ck} + A_s f_{yk})$ . Założono  $t_0 = 28$  dni,  $t = 10^5$  dni,  $RH = 70\%$ , cement N.

**Rys. 6.** Zależności moment – krzywizna (dla  $N = 0,2(bhf_{ck} + A_s f_{yk})$ ) wyznaczone różnymi metodami: EM – metoda efektywnego modułu, MS – metoda średnich naprężeń, WW – metoda współczynnika wieku, KK – metoda „krok po kroku”



**Rys. 7.** Zależności moment – krzywizna (dla  $N = 0,8(bhf_{ck} + A_s f_{yk})$ ) wyznaczone różnymi metodami: EM – metoda efektywnego modułu, MS – metoda średnich naprężeń, WW – metoda współczynnika wieku, KK – metoda „krok po kroku”



Przeprowadzone obliczenia pokazują dość dobrą zbieżność uzyskanych wyników trzema metodami EM, WW i KK. Wyniki uzyskane metodą MS nie są już tak zgodne. Analiza obliczeń potwierdza możliwość stosowania w przyszłych algorytmach metody efektywnego modułu (EM), która jest łatwiejsza w zastosowaniu ze względu na nieuwzględnianie naprężeń doraźnych. Jednak ze względu na potrzebę uzyskania dużej dokładności obliczeń preferowana jest metoda „krok po kroku” (KK).

## 8. Podsumowanie

- W artykule przedstawiono trzy metody uproszczone pozwalające na obliczenie odkształceń powstałych w wyniku pełzania betonu po czasie  $t$  pod wpływem dużych naprężeń ( $\sigma > 0,45f_{ck}$ ).
- Aproksymując całkę we wzorze (1) wyrażeniem (8) (metoda EM) i wykorzystując wyrażenie (2) opisujące funkcję naprężeń, uzyskano zależność (13). Zależność  $\sigma(t) - \varepsilon(t)$  opisana wzorami (4) i (13) może być stosowana w analizach odkształceń elementów konstrukcji, w których naprężenia przekraczają granicę liniowego pełzania. Metoda jest prosta w zastosowaniu i przy małych zmianach naprężeń daje zadowalające wyniki.
- Stworzono program komputerowy do generowania odkształceń i naprężeń w mimośrodowo ściskanych przekrojach elementów żelbetowych z uwzględnieniem pełzania, który został zweryfikowany odpowiednio przygotowanymi testami. Program wzbogacono animacją, która ukazuje zmianę odkształceń i naprężeń w przekroju pod wpływem zjawisk reologicznych.

- Przedstawione w p. 7 artykułu analizy pokazują, że stosowanie metody efektywnego modułu (EM), bazującego na prawie nieliniowego pełzania, pozwala na osiągnięcie zadowalającej zbieżności wyników z wynikami uzyskanymi metodą „krok po kroku”, co umożliwi szybsze oszacowanie wartości odkształceń.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1. General Rules and Rules for Buildings. EN 1992-1-1: 2008
- [2] Klempka K., Knauff M., Design of slender RC columns according to Eurocode and polish code compared with the improved numerical model, Archives of Civil Engineering LI, 1/2005, str. 23–42
- [3] Knauff M., Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2022
- [4] Gilbert R. I., Ranzi G., Time-dependent behaviour of concrete structures, Spon Press, London and New York, 2011
- [5] Gilbert R. I., Ranzi G., In-service deformations of reinforced concrete columns in biaxial bending, Proceedings of The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Hong Kong, 2011, str. 410–418
- [6] Knauff M., Grzeszykowski B., Golubińska A., Przykłady obliczania konstrukcji żelbetowych, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2/2016
- [7] Klempka K., Korzeniowski P., Metody analizy nośności słupów żelbetowych z uwzględnieniem pełzania betonu, Materiały Budowlane 10/2017, str. 32–34,
- [8] Arutiunian N., Niekatoryje waprosoy teorii połuczestzi, Moskwa, 1952
- [9] Jacenko E., Kornilowa S., Bowin A., Sossu G., Teoria połuczestzi żeliezobietonnych konstrukcji, Dniepropietrowsk, 2000
- [10] Ulickij I., Teoria i rasczot żeliezobietonnych stierzniowych konstrukcji s ucotom dlitielelnych prociesow, Izdatielstwo Budiwielnik, Kijew, 1967
- [11] Chiorino M., Napoli P., Mola F., Koprna M., Structural effects of time-dependent behaviour of concrete, Comité Euro-International du Beton: CEB Design Manual, Bulletin d'Information No 136m, 1980



**POMAGANIE  
BUDUJE 2026**

**DOŁĄCZ NA:**  
[pomaganiebuduje.pl](http://pomaganiebuduje.pl)

**16 MAJA**

**GALA CHARYTATYWNA**  
"MAJOWA NOC ZWYCIĘZCÓW"

**30 MAJA**

**III MISTRZOSTWA POLSKI  
BRANŻY BUDOWLANEJ**  
W KOLARSTWIE SZOSOWYM

**31 MAJA**

**PREMIERA:**  
GRAVEL & MTB BIKE CHALLENGE 2026





I JEDŹ  
Z NAMI!

# Synergiczny wpływ dodatku lateksu SBR i metod pielęgnacji na redukcję skurczu zapraw cementowych

Synergistic effect of SBR latex additive and curing methods on the reduction of cement mortar shrinkage

dr inż. Małgorzata Lenart (ORCID: 0000-0002-0698-4835), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, dr inż. Maciej Gruszczyński (ORCID: 0000-0002-0445-5745), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7447

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu dodatku polimerowego w postaci lateksu styrenowo-butadienowego (SBR) na skurcz oraz wybrane właściwości fizyczno-mechaniczne zapraw cementowych. Analizie poddano próbki pielęgnowane w trzech wariantach: bez ochrony przed wysychaniem, z zastosowaniem preparatu pielęgnacyjnego oraz pod przykryciem z folii polietylenowej (PE). Wykazano, że dodatek polimerowy, oprócz działania strukturotwórczego, wpłynął na zwiększenie rozptyłu mieszanki o około 35% w stosunku do kompozytu wzorcowego. Sama modyfikacja polimerem pozwoliła na redukcję skurczu mierzonego w warunkach swobodnych o około 30%, głównie poprzez ograniczenie odparowania wody z porów kapilarnych. Najkorzystniejszy efekt uzyskano w wyniku synergicznego oddziaływania modyfikacji materiałowej oraz pielęgnacji pod folią PE, co skutkowało obniżeniem skurczu po 90 dniach o 65%, przy jednoczesnym zachowaniu wytrzymałości na ściskanie na poziomie zbliżonym do zaprawy wzorcowej.

**Słowa kluczowe:** skurcz, polimer, pielęgnacja.

**Abstract:** The paper presents the results of an experimental study on the influence of a polymer additive in the form of styrene-butadiene rubber (SBR) latex on shrinkage and selected physical and mechanical properties of cement mortars. The specimens were cured using three different methods: without protection against moisture loss, with the application of a curing compound, and under polyethylene (PE) film. The results indicate that the polymer modification, in addition to its structure-forming effect, increased the flow diameter of the fresh mortar by approximately 35% compared to the reference mix. The use of the SBR latex alone reduced shrinkage measured under free deformation conditions by approximately 30%, mainly due to the limitation of water evaporation from the capillary pores. The most beneficial effect was achieved through the synergistic interaction of material modification and curing under PE film, which resulted in a reduction of shrinkage after 90 days by as much as 65%, while maintaining compressive strength at a level comparable to that of the reference mortar.

**Keywords:** shrinkage, polymer, curing.

## 1. Wprowadzenie

Współcześnie najpowszechniej stosowanym materiałem budowlanym jest beton cementowy. Charakteryzuje się on wieloma zaletami, m.in. elastycznością w formowaniu oraz bardzo dobrą wytrzymałością na ściskanie. Jednakże nie jest on pozbawiony wad, do których należy zaliczyć m.in. bardzo niską wytrzymałość na rozciąganie, zginanie oraz niekorzystne zmiany objętościowe takie jak skurcz [1, 2]. Oczywiście wady te można ograniczać w różnoraki sposób, np. poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego (włókien), zastosowanie odpowiedniego składu kompozytu np. poprzez użycie dodatków polimerowych, a przede wszystkim poprzez zastosowanie odpowiedniej pielęgnacji kompozytu wbudowanego w konstrukcję [3]. Celem niniejszych badań było porównanie wpływu modyfikacji kompozytu cementowego poprzez zastosowanie dodatku polimerowego (dozowanego na dwóch poziomach) oraz

równoczesnego wpływu różnego typu pielęgnacji próbek badawczych na przebieg sumarycznego skurczu rejestrowanego w ciągu 90 dni.

## 2. Rodzaje zmian objętościowych kompozytów cementowych

Zmiany objętościowe betonu nieobciążonego możemy podzielić na autogeniczne, do których zaliczyć można: skurcz chemiczny (wynikający ze zmniejszenia objętości produktów reakcji hydratacji w stosunku do objętości substratów) oraz skurcz od samoosuszenia (polegający na pobieraniu wody z porów kapilarnych przez hydratujące ziarna cementu) [4, 5]. Do niekorzystnych wewnętrznych zmian objętościowych należy również zaliczyć ekspansję spowodowaną nadmierną zawartością siarczanów, wolnego CaO lub MgO w cemencie, a także reakcję alkalia-krzemionka (ASR).

Z kolei do zmian objętościowych spowodowanych przez czynniki zewnętrzne należy zaliczyć: skurcz od wysychania ewentualnie pęcznienie kompozytu w środowisku wodnym wynikające z absorpcji wody, skurcz spowodowany ekstremalnym spadkiem temperatury, jak również ekspansją spowodowaną skrajnym wzrostem temperatury [6]. Do zmian objętościowych spowodowanych przez czynniki zewnętrzne należy również zaliczyć zmiany wynikające z reakcji chemicznych pomiędzy agresywnym środowiskiem zewnętrznym a związkami chemicznymi zawartymi w kompozycie cementowych np. skurcz od karbonatyzacji czy też pęcznienie spowodowane korozją siarczanową [7, 8]. Wpływ agresywnego środowiska zewnętrznego na kompozyt cementowy jest uwzględniony w klasach ekspozycji wymienionych w normie EN 206 „Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność”.

Wśród zmian objętościowych mających istotne znaczenie praktyczne należy wymienić również skurcz plastyczny, który zachodzi w mieszance betonowej bezpośrednio po ułożeniu, a będącej jeszcze w stanie plastycznym. Skurcz ten częściowo związany jest ze zmianami autogenicznymi i częściowo z czynnikami zewnętrznymi, jak odparowywanie wody z powierzchni świeżo ułożonego betonu i/lub zasysania wody przez chłonne podłoże [9].

### 3. Czynniki wpływające na odkształcenia skurczowe

Jak już wcześniej wspomniano, wielkość odkształceń skurczowych zależy zarówno od składu materiałowego kompozytu, jak również od środowiska zewnętrznego, w którym eksploatowany jest dany kompozyt cementowy. Wśród czynników materiałowych należy wymienić: wielkość współczynnika  $w/c$  (im wyższy, tym większy skurcz), ilość i wielkość kruszywa zawartego w kompozycie (im więcej kruszywa – zarówno ilościowo, jak i wielkościowo w kompozycie – tym mniejszy skurcz), ilość i rodzaj cementu (im więcej cementu i im bardziej jest on miałki tym większy skurcz), ilość i rodzaj domieszek i/lub dodatków zastosowanych w kompozycie (np. domieszki przeciwskurczowe, dodatki polimerowe, włókna) [10].

Jak zostało udowodnione, dodatki polimerowe powodują korzystne zmiany w strukturze modyfikowanego kompozytu. Zastosowanie dodatków polimerowych powoduje:

- powstanie ciągłej błony przenikającej matrycę cementową,
- zmiany wielkości i typu kryształów w spoiwie cementowym,
- zmniejszenie porowatości kompozytu na skutek ograniczenia ilości wody zarobowej.

Dodatkowo obecność polimeru istotnie poprawia budowę warstwy kontaktowej zaczynu cementowego z kruszywem. W kompozytach polimerowo-cementowych przestrzeń między ziarnami cementu jest wypełniona ukierunkowanymi cząsteczkami polimeru, co zwiększa powierzchnię kontaktu matrycy z kruszywem i w efekcie powoduje zagęszczenie strefy międzyfazowej. Wytworzona błona polimerowa oprócz kruszywa otacza także ziarna cementu. Spowalnia tym samym proces jego hydratacji.

Właściwość ta powoduje opóźnienie rozwoju wytrzymałości kompozytu na ściskanie, ale z drugiej strony pozwala na obniżenie wartości skurczu. Innym korzystnym efektem wprowadzenia do kompozytu cementowego dodatku polimeru jest jego zdolność do mostkowania mikrorys, co jest korzystne ze względu na redukcję skurczu i poprawę trwałości.

Skurcz całkowity zależy również od zewnętrznych warunków atmosferycznych, tj. wilgotności względnej, temperatury otoczenia, prędkości wiatru oraz związanej z tym prowadzonej pielęgnacji betonu. Zależy on również od wieku betonu, ponieważ znacząco maleje on wraz z upływem czasu [7]. Skurcz zależy również od wymiaru elementu betonowego, im moduł powierzchniowy elementu (iloraz powierzchni elementu betonowego narażonego na oddziaływania zewnętrzne do jego objętości) jest większy tym skurcz też jest większy [11].

### 4. Metody oznaczania skurczu kompozytów cementowych

Oznaczanie wielkości skurczu jest od dawna w obszarze zainteresowań badaczy. W związku z tym istnieje wiele metod badawczych skurczu, wśród których można przykładowo wymienić:

- Ring Test stosowany w metodzie zgodnej z ASTM C1581 oraz AASHTO T 334-08 (2020);
- pomiary miernikiem odległości (measurement gauge) stwardniałych próbek stosowane m.in. w: normie EN 12390-16, w metodzie Amslera (PN-84/B-06714/23), w metodzie Graff-Kaufmana (PN-84/B-06714/24), ASTM C157 i wielu innych;
- pomiar rynnami skurczowymi – metoda stosowana pierwotnie w normie OENORM B 3329, można w niej mierzyć zmiany objętościowe począwszy od ułożenia materiału w rynnie aż do późniejszego skurczu od wysychania;
- Bending drain test stosowany do pomiaru stabilności wymiarowej materiałów na podkłady podłogowe na bazie m.in. cementu, zgodnie z EN 13892-9. W metodzie tej można również określić wpływ zmiany temperatury na stabilność wymiarową (wpływ ogrzewania podłogowego);
- pomiar wczesnych zmian skurczowych metodą stożka skurczowego lub metodą Thin-Layer-Measurement System zastosowanych w przyrządach produkowanych przez firmę Schleibinger;
- pomiar skurczu chemicznego metodami opisanymi np. w pracy [12].

Podsumowując można zauważyć, że jest wiele czynników wpływających na skurcz kompozytów cementowych, co więcej różne metody badawcze, mające swoje wady i zalety, określają różny rodzaj skurczu w zależności od zastosowanych procedur pomiarowych. W związku z tym do badań własnych zastosowano system skurczowych rynien pomiarowych, ponieważ w największym stopniu mierzą one całkowity skurcz występujący w badanym kompozycie cementowym oraz wyniki badań są rejestrowane automatycznie, bez udziału człowieka z założoną wcześniej częstotliwością, a także wyniki te rejestrowane są bezpośrednio w milimetrach na metr długości próbki.

## 5. Badania własne

Celem badań własnych było określenie wpływu dodatku polimerowego dozowanego na dwóch poziomach na przebieg odkształceń skurczowych w przeciągu 90 dni prowadzenia badania. Skurcz oznaczano w rynnach skurczowych według procedury autorskiej opartej na metodzie rynien skurczowych zgodnej z OENORM B 3329, z modyfikacją. Dodatkowo badano wpływ rodzaju pielęgnacji na przebieg wspomnianych odkształceń skurczowych. Zastosowano trzy warianty pielęgnacji próbek: A – brak dodatkowej ochrony przed wysychaniem, co jest równoważne z brakiem pielęgnacji, B – pielęgnacja preparatem pielęgnacyjnym natryskiwanym na próbki, C – ochrona standardową folią przed wysychaniem próbek. Mierzony skurcz zapraw obejmuje łącznie efekty skurczu plastycznego, autogenicznego oraz skurczu od wysychania, przy czym ich rozdzielenie nie było celem pracy.

### 5.1. Zastosowane materiały i przebieg badań

Do badań zastosowano cement portlandzki popiołowy CEM II-/B-V 32,5R spełniający wymagania normy PN-EN 197-1. Zawartość popiołu lotnego krzemionkowego w cemencie wynosiła 21–35% zgodnie z deklaracją producenta. Wytypowano ten cement do badań, ponieważ z jednej strony charakteryzuje się on dobrymi parametrami technologicznymi, jest łatwo dostępny, a przede wszystkim cement ten ma niższy ślad węglowy niż cement portlandzki czysto klinkierowy, stąd jest proekologiczny, bardziej „przyjazny” środowisku.

Do badań jako kruszywo drobne zastosowano piasek kwarcowy, którego uziarnienie przedstawiono w tabeli 1.

Jako dodatek polimerowy zastosowano karboksylowany lateks styrenowo-butadienowy (SBR) w postaci dyspersji polimerowo-wodnej. Dodatek był w postaci białej, nieprzezroczystej cieczy o gęstości ok. 1,03 kg/dm<sup>3</sup>. Dodatek dodawano do wody zarobowej stosując podmianę tj. ilość wody zarobowej pomniejszono o wodę zawartą w dozowanej dyspersji, utrzymując stały wskaźnik w/c z uwzględnieniem, że wg producenta zawiera ona 50% części stałych. Dodatek dozowano na dwóch poziomach, tj. w ilości 5 i 8% w stosunku do masy cementu.

W trakcie badań wykonano trzy rodzaje zapraw: M1 – wzorcową, M2 – zaprawę modyfikowaną dodatkiem dyspersji polimerowej SBR w ilości 5% w stosunku do masy cementu oraz M3 – zaprawę zawierającą modyfikowaną dodatkiem dyspersji polimerowej SBR w ilości 8% m.c. Wszystkie zaprawy miały stały stosunek wodno-cementowy (w/c) wynoszący 0,50, a ich skład stanowił modyfikację zaprawy normowej zgodnej z EN 196-1. Bezpośrednio po przygotowaniu badano konsystencję świeżych zapraw metodą rozplywu, zgodnie z procedurą PN-EN 1015-3. Po wymieszaniu składników poszczególne zaprawy zostały

umieszczone w rynnach do pomiaru skurczu. Odczyty zmian objętościowych zapraw umiejscowionych w rynnach były rejestrowane i zapisywane automatycznie przez okres 90 dni.

W celu określenia wpływu pielęgnacji na wielkość mierzonych zmian objętościowych każdą z badanych zapraw umieszczono w trzech różnych rynnach pomiarowych, które zabezpieczono w różny sposób. Pierwszą pozostawiono odkrytą (brak dodatkowego zabezpieczenia przed wysychaniem), drugą pokryto preparatem pielęgnacyjnym a trzecią zabezpieczono folią polietylenową (PE).

W trakcie badań monitorowano temperaturę i wilgotność otoczenia, temperatura praktycznie była niezmienna i wynosiła 20–21°C, a wilgotność względna otoczenia wahała się w granicach 50–60% przez cały okres prowadzenia badania. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1.

### 5.2. Wyniki i analiza uzyskanych wyników badań

Wyniki badania konsystencji zapraw – zarówno normowej, jak również modyfikowanych dodatkiem dyspersji lateksu styrenowo-butadienowego (SBR) przedstawiono w tabeli 2.

Analizując powyższe wyniki badania rozplywu, można stwierdzić, że zaprawy z dodatkiem lateksu styrenowo-butadienowego (SBR) w ilości 5 i 8% m.c. charakteryzują się znacznie bardziej płynną konsystencją w porównaniu do zaprawy normowej. Porównując uśrednione wyniki, można zaobserwować, że ich średnica rozplywu jest większa o około 35% w stosunku do zaprawy referencyjnej (normowej). Zjawisko to należy



Rys. 1. Widok badanych próbek i stanowiska badawczego

Tabela 1. Uziarnienie piasku zastosowanego do badań

| Fracja        | 0-0,125 | 0,125-0,25 | 0,25-0,5 | 0,5-1,0 | 1,0-2,0 | 2,0-4,0 |
|---------------|---------|------------|----------|---------|---------|---------|
| Zawartość [%] | 2       | 16         | 44       | 22      | 11      | 5       |

**Tabela 2.** Wyniki pomiarów rozplywu zapraw (normowa i modyfikowane dodatkiem lateksu styrenowo-butadienowego (SBR))

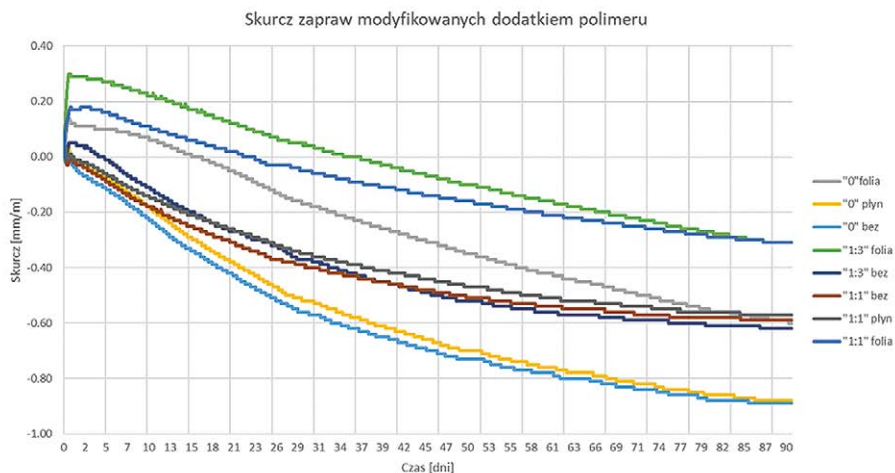
| Typ zaprawy           | Rozplyw zaprawy [mm] |                      |         |
|-----------------------|----------------------|----------------------|---------|
|                       | pomiar na kierunku X | pomiar na kierunku Y | średnia |
| M1 normowa            | 157                  | 159                  | 158     |
| M2 z dodatkiem 5% SBR | 212                  | 214                  | 213     |
| M3 z dodatkiem 8% SBR | 213                  | 215                  | 214     |

tłumaczyć uplastyczniającym działaniem dyspersji polimerowej SBR (efekt smarujący cząstek polimeru, tzw. ball bearing effect), która korzystnie wpływa na reologię świeżej mieszanki. Analizując przedstawione na rysunku 2 wykresy obrazujące przebieg odkształceń skurczowych, można zauważyć, że w każdej z badanych zapraw zaobserwowano zwiększenie wymiarów w początkowym okresie badań. Największe zmiany zaobserwowano dla zapraw pielęgnowanych pod folią PE i wynosiły one: +0,12 mm/m dla zaprawy wzorcowej, +0,18 mm/m dla zaprawy z 8% zawartością polimeru oraz +0,30 mm/m dla zaprawy z 5% zawartością polimeru SBR w stosunku do masy cementu. Zaobserwowane dodatnie odkształcenia (narastanie) w początkowym okresie (szczególnie pod folią PE) spowodowane są:

- intensywną hydratacją w warunkach wysokiej wilgotności,
  - pęcznieniem struktury polimerowej w obecności wody,
  - ograniczeniem gradientów wilgotności w przekroju próbki.
- Dodatnie odkształcenia zapraw modyfikowanych dodatkiem dyspersji SBR w pierwszych godzinach spowodowane jest także tym, że polimery (szczególnie te zawierające emulgatory/surfaktanty) są higroskopijne i mogą absorbować wodę, co w połączeniu z pęcznieniem żelu C-S-H prowadzi do ekspansji.

Po 90 dniach badania można zauważyć, że uzyskane wyniki pogrupowały się w trzy obszary. Pierwszy z nich (największy skurcz, najniższe wykresy w 90. dniu badania na rysunku 2) obejmuje przebieg skurczu dla zapraw wzorcowych bez pielęgnacji (-0,89 mm/m) oraz zaprawy wzorcowej pokrytej preparatem pielęgnacyjnym (-0,88 mm/m). Jak można zauważyć, wpływ pielęgnacji preparatem pielęgnacyjnym nie jest aż tak znaczący jak wpływ pielęgnacji pod folią. Niemniej jednak jego wpływ jest zauważalny i znaczący zwłaszcza w pierwszym okresie od ułożenia świeżych zapraw w rynnach.

**Rys. 2.** Wykres zmian skurczowych badanych zapraw w okresie 90 dni



Trzeci obszar (najwyższe wykresy w 90. dniu badania na rysunku 2) obejmuje przebieg odkształceń skurczowych obydwu zapraw modyfikowanych polimerem, zarówno tej z 5% jak i 8% w stosunku do cementu zawartością lateksu SBR pielęgnowanych pod folią. Ich skurcz po 90 dniach badania wyniósł -0,31 mm/m. Analizując przebieg krzywej skurczowej zaprawy z 8% m.c. zawartością polimeru, można zauważyć, że ma ona łagodniejszy przebieg, co będzie skutkowało najmniejszym skurczem w dłuższym okresie czasu (w którym nie prowadzono już pomiarów).

W drugim obszarze wyników (środkowe wykresy w 90. dniu badania przedstawione na rysunku 2) znalazły się wszystkie pozostałe próbki modyfikowane polimerem, a pielęgnowane preparatem lub niezabezpieczone przed odparowywaniem. Ich skurcz wyniósł od -0,57 mm/m dla zaprawy modyfikowanej 8% m.c. zawartością polimeru i pielęgnowanej preparatem pielęgnacyjnym do -0,62 mm/m dla zaprawy z 5% m.c. zawartością polimeru i niepoddanej żadnej pielęgnacji.

W tym obszarze znalazła się również zaprawa wzorcowa pielęgnowana pod folią. Analizując przebieg zmian objętościowych dla tego przypadku, warto zauważyć, że po zaformowaniu zaprawa ta nie wykazywała ujemnych zmian (skurczu) przez długi czas, tj. przez 15 dni, czyli zabezpieczenie folią przed odparowaniem wody spełniło oczekiwania. Niemniej jednak przebieg wykresu dla tej próbki ma dość gwałtowny spadek, co pozwala szacować, że w dłuższym okresie (wykraczającym poza czas trwania badania) skurcz dla tego przypadku będzie znacząco wyższy niż dla próbek modyfikowanych polimerem.

Należy podkreślić, że pielęgnacja pod folią PE nie eliminuje skurczu, lecz istotnie opóźnia jego rozwój, natomiast trwałe ograniczenie jego wartości uzyskano dopiero w połączeniu z modyfikacją polimerową.

Wyniki badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie przedmiotowych zapraw – normowej i modyfikowanych dodatkiem lateksu styrenowo-butadienowego (SBR), określone na beleczkach 40x40x160 mm po 28-dniach dojrzewania w warunkach normowych przedstawiono w tabeli 3.

Analiza uzyskanych wyników badań wytrzymałości przedmiotowych zapraw wyraźnie wskazuje na pozytywny wpływ

**Tabela 3.** Wyniki badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie zapraw cementowych (normowa i modyfikowane dodatkiem lateksu styrenowo-butadienowego SBR)

| Typ zaprawy           | Wytrzymałość na zginanie N/mm <sup>2</sup> |         | Wytrzymałość na ściskanie N/mm <sup>2</sup> |         |
|-----------------------|--|---------|---|---------|
|                       | $f_{\bar{n}}$                              | średnia | $f_{ci}$                                    | średnia |
| M1 normowa            | 7,8  | 7,6     | 43,5  | 43,5    |
|                       |  |         | 43,3  |         |
|                       | 7,7  |         | 42,6  |         |
|                       | 7,4  |         | 43,1  |         |
| M2 z dodatkiem 5% SBR | 9,0  | 9,2     | 44,6  | 42,1    |
|                       |  |         | 43,7  |         |
|                       | 9,0  |         | 42,8  |         |
|                       | 9,5  |         | 41,1  |         |
|                       |  |         | 42,2  |         |
| M3 z dodatkiem 8% SBR | 10,5                                       | 10,6    | 42,5  | 43,6    |
|                       |  |         | 41,9  |         |
|                       | 10,9                                       |         | 42,2  |         |
|                       | 10,4                                       |         | 43,5  |         |
|                       |  |         | 44,0  |         |
|                       | 43,8                                       |         |   |         |
|                       | 43,1                                       |         |   |         |
|                       | 44,4                                       |         |   |         |
|                       | 42,9                                       |         |   |         |

dodatku lateksu styrenowo-butadienowego (SBR) na wytrzymałość na zginanie w granicach 18–29% i jest proporcjonalny do ilości zastosowanego modyfikatora polimerowego. Natomiast wyniki badań wykazały, że wpływ dodatku polimerowego SBR na uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie jest praktycznie pomijalny w stosunku do zaprawy normowej.

## 6. Podsumowanie

Podsumowując, można zauważyć synergiczny wpływ zarówno pielęgnacji kompozytu, jak i jego modyfikacji polimerem na skurcz oznaczony po 90 dniach twardnienia.

Najwyższym skurczem, zgodnie z oczekiwaniami, wykazały się zaprawy niemodyfikowane i niepielęgnowane lub pielęgnowane poprzez pokrycie preparatem pielęgnacyjnym. Skurcz ten wyniósł -0,89 mm/m. Kolejnym poziomem skurczu wykazały się kompozyty modyfikowane polimerem na różnym poziomie, pielęgnowane preparatem oraz niepielęgnowane. Ich skurcz wynosił od -0,57 mm/m do -0,62 mm/m, co stanowi od 64 do 70% skurczu zaprawy wzorcowej niemodyfikowanej i niepielęgnowanej. Najmniejszym skurczem wykazały się zaprawy modyfikowane polimerami oraz pielęgnowane pod folią. Ich skurcz po 90 dniach wyniósł -0,31 mm/m, co stanowi ok. 35% skurczu zaprawy niemodyfikowanej i niepielęgnowanej. W związku z tym na podstawie zrealizowanego programu badawczego można wyciągnąć poniższe wnioski.

- Dodatek karboksylowanego lateksu styrenowo-butadienowego (SBR) powoduje zmniejszenie zmian skurczowych

o ok. 30% w odniesieniu do zaprawy wzorcowej niemodyfikowanej, określonych po 90 dniach twardnienia.

- Po 90 dniach twardnienia nie odnotowano istotnych różnic w wielkości skurczu pomiędzy zaprawami modyfikowanymi 5 a 8% w stosunku do masy cementu dodatkiem roztworu lateksu styrenowo-butadienowego (SBR).

- Synergiczne oddziaływanie pielęgnacji pod folią oraz modyfikacji polimerem spowodowało zmniejszenie zmian skurczowych określonych po 90 dniach twardnienia aż o 65% w odniesieniu do zaprawy wzorcowej niepielęgnowanej.

- Uzyskane wyniki wskazują, że redukcja skurczu zapraw modyfikowanych dodatkiem lateksu styrenowo-butadienowego SBR nie odbywa się kosztem ich wytrzymałości.

- Uzyskane efekty redukcji skurczu odnoszą się do badanych zapraw o stałym wskaźniku w/c = 0,50 i mogą ulegać zmianie przy innych składach materiałowych oraz wyższych poziomach dozowania dodatku polimerowego.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Dadd L., Visintin P., Bennett B., Xie T., Characterisation of shrinkage, carbonation and chloride penetration in multi-generation recycled aggregate concrete at equivalent compressive strengths, *Construction and Building Materials* 2/2025, art.141111, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141111>
- [2] Lenart M., Gruszczyński M., The research of mortars shrinkage made with reclaimed aggregate, *Procedia Structural Integrity* 23, 2019, str. 113–118, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.072>
- [3] Pichler C., Schmid M., Traxl R., Lackner R., Influence of curing temperature dependent microstructure on early-age concrete strength development, *Cement and Concrete Research* 102, 2017, str. 48–59, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.022>
- [4] Zhang N., Yang Q., Li D., Yu Y., Jiang X., Xu J., Autogenous and drying shrinkage properties of precast recycled aggregate concrete, *Case Studies in Construction Materials* 22, 2025, e04355, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04355>
- [5] Shen D., Jiang J., Shen J., Yao P., Jiang G., Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age, *Construction and Building Materials* 103, 2016, str. 67–76, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.039>
- [6] Li Q., Xia H., Yuan G., Shu Q., Experimental study on the free expansion deformation of concrete during the cooling process after being heated to high temperature, *Construction and Building Materials* 337, 2022, art.127617, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127617>
- [7] Neville A. M., *Properties of concrete* (5th edition), Pearson, 2012
- [8] Song Y., Damiani R. M., Lange D. A., Continuous monitoring of the moisture, shrinkage, and carbonation effects on foam concrete performance, *Construction and Building Materials* 411, 2024, art. 134185, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134185>
- [9] Nasir M., Alimi W. O., Adeoluwa Oladapo E., Imran M., Kazmi Z. A., Behavior of drying and plastic shrinkage of Portland cement concrete prepared and cured under harsh field, *Development in Built Environment* 16, 2023, art. 100252, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100252>
- [10] Wang J., Zhao C., Li Q., Song G., Hu Y., The synergistic effect of recycled steel fibers and rubber aggregates from waste tires on the basic properties, drying shrinkage, and pore structures of cement concrete, *Construction and Building Materials* 470, 2025, art. 140574, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140574>
- [11] Lenart M., Assessment of mortar shrinkage in aspect of organic and inorganic modifiers use, *Procedia Engineering*, 108, 2015, str. 309-315, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.152>
- [12] Holt E. E., Early age autogenous shrinkage of concrete, *VTT Publ.* 2001, str. 2–184

# Cement wieloskładnikowy sposobem na produkcję betonu o obniżonym śladzie węglowym

## Multi-component cement as a way to produce low-impact concrete carbon footprint

mgr inż. Albert Grajek (ORCID: 0009-0007-4150-6189), dr hab. inż. Wioletta Raczkiewicz (ORCID: 0000-0001-5929-3571), dr inż. Kamil Bacharz (ORCID: 0000-0002-6626-6202), Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7448

**Streszczenie:** Cement portlandzki to najbardziej rozpowszechniony cement stosowany w betonach konstrukcyjnych. Jednocześnie jest to cement, przy produkcji którego uwalniana jest do atmosfery duża ilość dwutlenku węgla. Stąd jeżeli w cemencie część klinkieru zastąpi się takimi dodatkami, jak: popiół lotny, żużel wielopieczowy, czy pucolany, to ilość uwalnianego przy jego produkcji CO<sub>2</sub> obniży się, a tym samym będzie można uzyskać beton o niskim śladzie węglowym, potocznie mówiąc tzw. eko beton. Konieczna jest jednak weryfikacja, czy beton z cementem wieloskładnikowym, o obniżonym śladzie węglowym spełnia wszystkie istotne parametry betonu konstrukcyjnego. W artykule przedstawiono stan dotychczasowej wiedzy na temat możliwości użycia cementów wieloskładnikowych do produkcji betonów o obniżonym śladzie węglowym.

**Słowa kluczowe:** beton o obniżonym śladzie węglowym, cement wieloskładnikowy, parametry betonu, ekologia.

**Abstract:** Portland cement, the most common cement used in structural concrete, is also the cement whose production releases the largest amount of carbon dioxide into the atmosphere. Replacing some of the clinker in cement with additives such as fly ash, blast furnace slag, or pozzolans will reduce the amount of CO<sub>2</sub> released during its production, allowing for the production of low-carbon concrete, so-called „eco concrete”. However, reliable knowledge is necessary to ensure that concrete made with multi-component cement meets all the essential parameters of structural concrete. This article presents the current state of knowledge regarding the potential use of multi-component cements to produce concrete with a reduced carbon footprint.

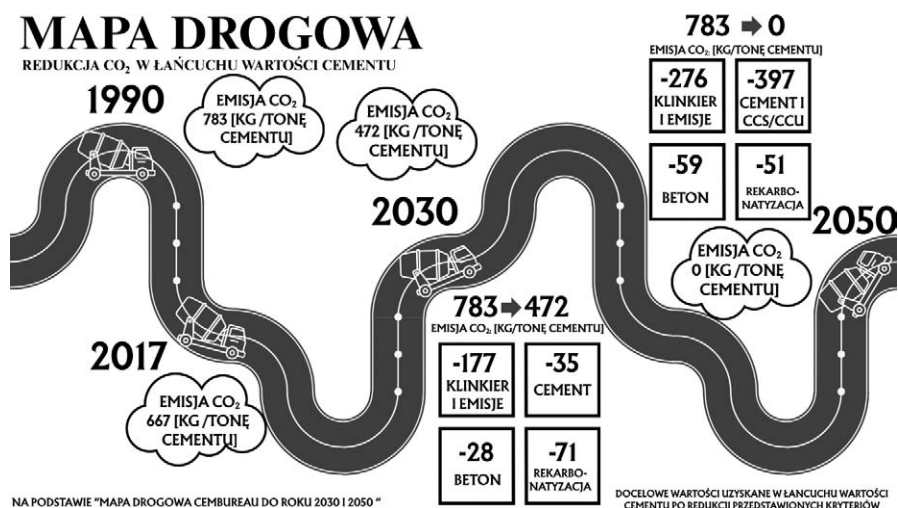
**Keywords:** concrete with a reduced carbon footprint, multi-component cement, concrete parameters, ecology.

## 1. Wprowadzenie

Ogólnoeuropejska strategia na rzecz transformacji gospodarki, nazywana Europejskim Zielonym Ładem [1N], ma za zadanie wprowadzenie wielu inicjatyw i innowacji, zarówno w sposobie produkcji, jak i konsumpcji, w celu ograniczenia zmian klimatu i uzyskania neutralności klimatycznej do 2050 roku, co bezpośrednio powinno wpłynąć na poprawę stanu zdrowia i samopoczucia Europejczyków. Z tego względu wprowadzono Europejskie Prawo Klimatyczne oraz pakiet wniosków legislacyjnych o nazwie „Gotowi na 55” (ang. „Fit for 55”) [2–4]. Jedną z kluczowych inicjatyw Zielonego Ładu jest dążenie do, wstępnie ograniczenia, a w dalszej

perspektywie, do całkowitej redukcji dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) w wielu gałęziach gospodarki i produkcji [5] (rys. 1). Ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> wymaga uzyskania większej ilości energii ze źródeł odnawialnych [6].

Zmiany zalecone przez Europejski Zielony Ład przewidziano również dla sektora budowlanego [7]. Ekologiczność w dziedzinie budownictwa jest niezwykle trudna, ponieważ branża ta jest



**Rys. 1.** Mapa drogowa przedstawiająca redukcję emisji CO<sub>2</sub> w łańcuchu wartości cementu na przestrzeni lat oraz prognozy do 2050 roku

**Tabela 1.** Skład cementów objętych badaniem ustalony na podstawie norm PN-EN 197-1:2012 i EN 197-5:2021-07

| Oznaczenie | Rodzaj cementu   | Składniki główne |                             |                        |           |                           |
|------------|------------------|------------------|-----------------------------|------------------------|-----------|---------------------------|
|            |                  | klinkier K       | popiół lotny krzemionkowy V | żużel wielkopieczowy S | wapień LL | Składniki drugorzędne [%] |
| C1         | CEM II/C-M(S-V)  | 50-64            | 36-50                       |                        | -         | 0-5                       |
| C2         | CEM VI (S-V)     | 35-49            | 6-20                        | 31-59                  | -         |                           |
| C3         | CEM III/A 42,5N  | 35-64            | -                           | 36-65                  | -         | 0-5                       |
| C4         | CEM II/C-M(S-LL) | 50-64            | -                           | 36-50                  |           | 0-5                       |

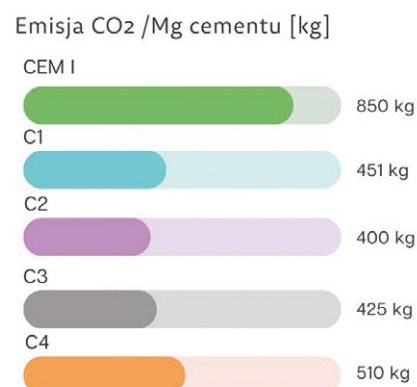
ogromnie uprzemysłowiona i charakteryzuje się wykorzystaniem ogromnej liczby materiałów i surowców. Z kolei sam przemysł cementowy jest jednym z najbardziej emisyjnych sektorów gospodarki budowlanej [8, 9]. Jego udział w globalnej emisji gazów cieplarnianych wynosi 3%, co jest równoznaczne z 1,4 mld ekwiwalentu CO<sub>2</sub> [10]. Dlatego starania w ograniczeniu emisji CO<sub>2</sub> wynikającej z produkcji cementu, są priorytetowe i kluczowe.

## 2. Cementy niskoemisyjne wieloskładnikowe

Chcąc zredukować emisję CO<sub>2</sub> w branży budowlanej, postanowiono m.in. wprowadzić zmiany przy produkcji cementu [11]. Jedną z głównych modyfikacji dotyczy zastąpienia klinkieru portlandzkiego (którego wypalanie generuje dużą emisyjność dwutlenku węgla) innymi składnikami mineralnymi [12-15]. Pozwoliło to na zmniejszenie liczby emisji CO<sub>2</sub> o 200 kg w ciągu ostatnich 11 lat. Istnieje wiele publikacji, w tym m.in. Wandocha i Tałaja [16] lub Król i Kuterasińskiej [17], w których autorzy przedstawiają dane dotyczące emisyjności CO<sub>2</sub> w przemyśle cementowym oraz propozycje redukcji ilości emisji tego gazu do atmosfery. W publikacji [16] autorzy przedstawili przybliżoną emisję CO<sub>2</sub>/Mg wyprodukowanego cementu: dla cementu CEM I emisja ta wyniosła 850 kg (rys. 2) w procesie produkcji 1 Mg cementu, podczas gdy produkcja cementów wieloskładnikowych w zastępstwie cementu portlandzkiego pozwala zredukować tę liczbę do 340÷450 kg na 1 Mg cementu, co pokazuje tabela 1. Opisane badania przeprowadzone zostały na cementach CEM II/C-M(S-V), CEM VI (S-V), CEM III/A 42,5N oraz CEM II/C-M(S-LL). Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykazały, że największy przyrost wytrzymałości zachodził między 28 a 90 dniem, a największą wytrzymałością charakteryzowały się cementy CEM II/C-M (S-V) i CEM VI (S-V), dla których jej wartość zbadana po 90 dniach przekraczała 70 MPa. Badania na mrozoodporność dowiodły, że wszystkie badane cementy po 28 dniach spełniały stopień mrozoodporności F150.

W pracy [17] autorki wykazały, że nowe cementy wieloskładnikowe mogą być stosowane do produkcji betonów wykorzystywanych w konstrukcjach masywnych, takich jak elementy mostów czy wiaduktów. Na podstawie swoich badań dowiodły, że cementy wieloskładnikowe klasy 42,5 N osiągają wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach dojrzewania wynoszącą 70 MPa (rys.3). Kluczowym czynnikiem decydującym o uzyskaniu tak wysokiej wytrzymałości jest odpowiedni stosunek w/c. Obniżenie go z 0,5 do 0,4 lub nawet do 0,3 powoduje podwojony wzrost wytrzymałości

**Rys. 2.** Szacunkowa emisja CO<sub>2</sub>/Mg wyprodukowanego cementu



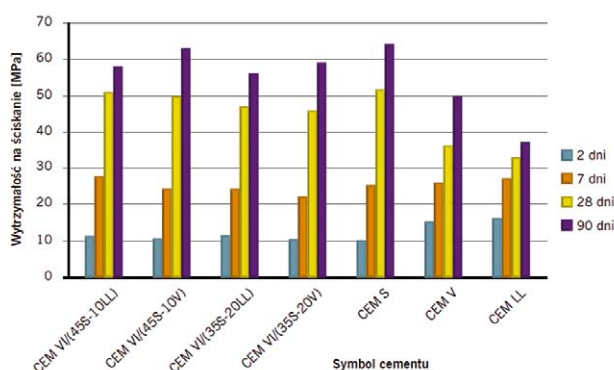
wczesnej w okresie od 2 do 7 dni. Omawiane cementy CEM V charakteryzują się wolnym twardnieniem oraz osiąganiem wysokich wytrzymałości w późniejszym okresie. Niestety, betony mające w składzie te cementy charakteryzują się większą podatnością na karbonatyzację. Badania Chłędzińskiego i Garbacika [18] dowiodły, że betony z cementem CEM V (o zawartości 52% dodatku popiołu i żużla) osiągają bardzo zbliżone wytrzymałości do betonów z cementem CEM I, ale są bardziej podatne na karbonatyzację, a jej głębokość jest kilkakrotnie większa niż w betonie z cementem CEM I bez dodatków. Stąd, aby zmniejszyć szybkość i zasięg karbonatyzacji, konieczne jest zwiększenie szczelności betonu, co można uzyskać przez obniżenie współczynnika w/c. Badania de Silvy i de Brito opisane w [19] dowiodły, że cementy mające w swoim składzie składniki wapienne charakteryzują się dużą szczelnością i małą porowatością. Wapienne wypełniacze działają jako drobne ziarno wypełniające wolne przestrzenie w matrycy cementowej, co wpływa na płynność mieszanki betonowej. Badania dowiodły również, że wspomniane składniki wapienne pełnią funkcję nukleatora krystalizacji produktów hydratacji. Skutkuje to przyspieszeniem tworzenia fazy C-S-H, dzięki czemu wzrasta wytrzymałość początkowa. Na podstawie badań opisanych w [19] autorzy stwierdzili, że przy tej samej wytrzymałości na ściskanie, moduł sprężystości dla mieszanek z wapiennymi wypełniaczami był nieco wyższy niż dla mieszanek z popiołem lotnym. W cemencie, w którym dojdzie do połączenia wapienia i 40–30% popiołu lotnego, dochodzi do zmiany struktury porowatej, powstają dwa typy porów: nanopory i mikropory. Odnotowano również znaczną liczbę makroporów, które jednak wraz z wiekiem betonu zmniejszały swoją średnicę powodując zmniejszenie porowatości. Taka struktura betonu gwarantuje wysoką szczelność i powoduje zmniejszenie poziomu przepuszczalności wody pod ciśnieniem.

W związku z powyższym cementy wieloskładnikowe cechują się najmniejszym poziomem przepuszczalności. W ich mikrostrukturze pory są wypełniane przez dodatkowe produkty hydratacji, co niweluje ich późniejsze połączenia.

W pracy [20] Bentz i współautorzy dowiedli, że drobno zmielony wapień powoduje skrócenie czasu wiązania w cementach, gdzie występuje duża ilość popiołu lotnego. Wapień w tym przypadku jest bardziej efektywny niż pył krzemionkowy. Proszek wapienny, dostarczając wapń i zapewniając dużą powierzchnię dla nukleacji, skraca okres inkubacji i przyspiesza dalszą hydratację. Jednak dla potwierdzenia tego procesu, wymagane są dalsze badania. Ze względu na obecność w składzie popiołu i wapienia, cementy wieloskładnikowe charakteryzują się zwiększoną szczelnością i plastycznością. Ponadto biorąc pod uwagę, że beton uznawany jest za mrozoodporny w przypadku, jeśli moduł sprężystości po 28 cyklach zamrażania i odmrażania nie spadnie poniżej 75% swojej wartości początkowej, można stwierdzić, że betony z cementami wieloskładnikowymi spełniają ten warunek, co wykazały badania opisane w [20]. Niemniej jednak należy stwierdzić, że betony zawierające CEM I, osiągają największą odporność na środki odladzające.

Cementy mające w swoim składzie żużel wielkopieczowy i popiół lotny krzemionkowy zaleca się do stosowania w betonach wykorzystywanych w konstrukcjach masowych. Wynika to z faktu, że oba te składniki znacząco wpływają na obniżenie poziomu ciepła hydratacji.

Z kolei dodatek wapienia przyspiesza ten proces. Potwierdzają to badania Vance'a [21]. Obecność w cemencie popiołu i żużla wpływa również na ograniczenie skurczu betonu. Im większy stosunek zawartości popiołu względem żużla, tym mieszanka betonowa jest płynniejsza, a opad stożka większy. Odwrócenie proporcji daje efekt odwrotny, powodując obniżenie rozplywu stożka. Cement wieloskładnikowy CEM VI, to dość nowa kategoria cementu wprowadzona w ramach aktualizacji normy PN-EN 197-5 [22], która rozszerza klasyfikację cementów o cementy o niższej zawartości klinkieru, a co za tym idzie – niższym śladzie węglowym. To część działań przemysłu cementowego w kierunku zrównoważonego rozwoju i redukcji emisji CO<sub>2</sub>. Cement wieloskładnikowy CEM VI spełnia wymagania normy PN-EN 197-1 [23].



**Rys. 3.** Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie zapraw trójskładnikowych (na podstawie Król A., Kuterasińska J., „Skład i właściwości nowych cementów wieloskładnikowych CEM VI”) [17]

Jego produkcja pozwala zredukować emisję CO<sub>2</sub> o około 55–65%. Dzięki temu cement ten idealnie wpasowuje się w ideę Europejskiego Zielonego Ładu. Poszczególne składniki cementu wieloskładnikowego wpływają na poprawę wielu jego właściwości, takich jak: wytrzymałość w późniejszym okresie dojrzenia betonu (rys. 3), obniżenie ciepła hydratacji, wydłużony czas wiązania, obniżenie ryzyka powstania reakcji alkaicznej kruszyw oraz zwiększenie odporności na agresywne oddziaływanie czynników chemicznych.

### 3. Zastosowanie cementu wieloskładnikowego w betonie konstrukcyjnym

Jednym z podstawowych zadań betonu w konstrukcjach żelbetonowych, obok zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie, jest zabezpieczenie stalowych prętów zbrojenia przed korozją. W tym celu, w zależności od klasy ekspozycji, konstrukcja powinna być wykonana z betonu o odpowiedniej klasie, zapewniającej minimalną ilość cementu [24]. Ze względu na wprowadzenie do produkcji cementów wieloskładnikowych, podjęte zostały badania nad wpływem zastosowania takiego, zmodyfikowanego cementu na trwałość betonu w kontekście jego ochronnej roli względem zbrojenia.

W pracy [25] Gurdian i współautorzy analizowali zachowanie stali zbrojeniowej w betonach z dodatkami mineralnymi, takimi jak popiół lotny i zużyty katalizator krakingu katalitycznego (FCC) oraz z zastosowaniem kruszywa z recyklingu. Celem badań była ocena wpływu zastosowania tych składników na odporność betonu na korozję w warunkach oddziaływania chlorków. Wyniki pokazały, że wprowadzenie kruszywa z recyklingu nie prowadziło do istotnego obniżenia odporności na korozję w porównaniu do mieszanek referencyjnych z kruszywem naturalnym. Kluczowe znaczenie miała jednak obecność dodatków mineralnych, które poprawiały strukturę matrycy cementowej i zmniejszały jej przepuszczalność.

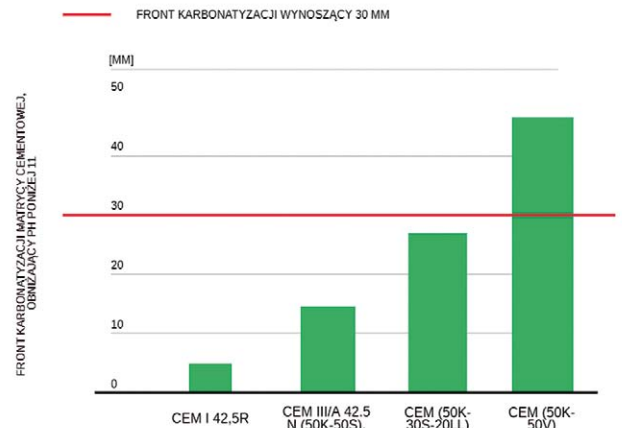
Z kolei autorzy publikacji [26], Achenbach i Raupach skoncentrowali się na ocenie, jak nowoczesne, niskoemisyjne spoiwa cementowe wpływają na pasywację stali zbrojeniowej, czyli powstawanie i utrzymywanie ochronnej warstwy tlenkowej w cienkowarstwowych zaczynach. Autorzy zbadali materiały aktywowane alkalicznie o wysokiej i niskiej zawartości wapienia, cement wapniowo-sulfoglinowy oraz spoiwo wytwarzane z faz hydratu krzemianu wapnia syntetyzowane w autoklawie. Ocenę oparli na pomiarach potencjału korozyjnego obwodu otwartego oraz oporu polaryzacji. Z badań wynikało, że stal wyraźnie ulegała pasywacji w żużlu aktywowanym alkalicznie i spoiwie wytwarzanym z faz hydratu krzemianu wapnia, ale już cement wapniowo-sulfoglinowy wykazywał najniższe potencjały obwodu otwartego i oporu polaryzacji, co wskazywało na mniej efektywny poziom pasywacji. Autorzy dowiedli, że niektóre ekologiczne spoiwa mogą skutecznie zapewnić ochronę stali zbrojeniowej porównywalnie lub lepiej niż tradycyjny cement, tworząc odpowiednią warstwę pasywną na zbrojeniu. Podkreślili jednak, że nie każde ekologiczne spoiwo jest

odpowiednie do zastosowania w konstrukcjach żelbetowych, dlatego konieczne jest indywidualne badanie ich właściwości pod kątem trwałości i skuteczności ochrony stali zbrojeniowej. Alwash i współautorzy [27] skupili się na ocenie wpływu korozji na beton niskoemisyjny, w którym część cementu portlandzkiego zastąpiono materiałem o charakterze pucolanowym w trzech stężeniach: 0; 25 oraz 50%. Przeprowadzone badania dowiodły, że nie zawsze beton o wyższej klasie wytrzymałościowej zapewni lepszą trwałość stali zbrojeniowej.

Celem pracy Azeez i współautorów [28] było zbadanie, jak różne poziomy zastąpienia cementu portlandzkiego przez dodatki uzupełniające wpływają na właściwości mechaniczne betonu oraz odporność na korozję stali zbrojeniowej. Badania przeprowadzono na mieszankach betonu z dodatkiem metakaolinu (10, 15, 20%) i pyłu krzemionkowego (10, 15, 20%). Autorzy pracy doszli do wniosku, że zastąpienie cementu metakaolinem i pyłem krzemionkowym poprawia zarówno wytrzymałość betonu, jak i odporność na korozję stali zbrojeniowej. Stosowanie tych składników w betonie może przyczynić się do zmniejszenia ilości cementu portlandzkiego w betonie, co wpływa pozytywnie na środowisko.

Thummar i współautorzy [29] dokonali przeglądu literatury na temat korozji zbrojenia w betonie aktywowanym alkalicznie (AAC) o obniżonym śladzie węglowym, szczególnie w warunkach działania chlorków. Autorzy stwierdzili, że AAC wykazuje właściwości, które można porównać z betonem konwencjonalnym, jeśli chodzi o jego ochronną rolę względem stali w przypadku działania chlorków. Jednak nie potwierdzili korelacji wyników doświadczalnych z zachowaniem się betonu zbrojonego w warunkach rzeczywistych.

Badania nad trwałością betonu z cementem o obniżonej zawartości klinkieru portlandzkiego, prowadzili również autorzy pracy [30]. Analizowali oni, jak ograniczenie zawartości klinkieru portlandzkiego w betonie wpływa na postęp karbonatyzacji oraz na właściwości ochronne betonu względem stali zbrojeniowej. Badania przeprowadzone zostały z wykorzystaniem monitorowania korozji stosując technikę korozymetrii rezystancyjnej. Do badań wykorzystano beton o niskim śladzie węglowym mający w swoim składzie mniejszą ilość klinkieru portlandzkiego niż klasyczny CEM I. Badania wykazały, że znaczne zmniejszenie zawartości klinkieru portlandzkiego w mieszance betonu o niskim śladzie węglowym prowadzi do zwiększenia postępu karbonatyzacji betonu (rys. 4). Powoduje to, że właściwości ochronne betonu względem stali zbrojeniowej ulegają pogorszeniu. Ponadto głębokość karbonatyzacji i właściwości ochronne betonu zależą nie tylko od zawartości klinkieru portlandzkiego, ale także od aktywności głównych składników nieklinkierowych użytych w mieszance. Sirivivatnanon i współautorzy opisali w pracy [31] wyniki swoich badań, w ramach których porównali wpływ trzech różnych warunków oddziaływania środowiskowego na korozję stali zbrojeniowej w betonie o niskim śladzie węglowym z dużym udziałem dodatków mineralnych, w tym popiołów lotnych czy żużla wielkopieczowego. Analizie poddano: przyspieszone testy korozji z użyciem prądu, dziewięcioletnie badania w warunkach



**Rys. 4.** Zasięg frontu karbonatyzacji betonów badanych przez Tałaja i współautorów powodujący depasycję stali zbrojeniowej ( $pH < 11$ )

laboratoryjnych z cykliczną ekspozycją na roztwór NaCl oraz pięcioletnią ekspozycję w rzeczywistym środowisku morskim w strefie pływów. Do pomiarów wykorzystana została metoda potencjometryczna (half-cell potential) wykonywana zgodnie z normą ASTM C876-15. Autorzy stwierdzili, że testy przyspieszone, które zwykle stosuje się w tego typu badaniach, mogą być użyteczne w krótkiej perspektywie, jednak często prowadzą do niespójnych wyników, szczególnie przy wyższych wartościach wskaźnika w/c, co ogranicza ich wiarygodność jako samodzielnego narzędzia diagnostycznego. Wyniki przeprowadzonych przez nich badań okazały się jednak niejednoznaczne. W konkluzji podkreślono, że ocena trwałości betonów niskoemisyjnych z dodatkami mineralnymi wymaga stosowania zróżnicowanych metod badawczych oraz długoterminowej ekspozycji, gdyż same metody przyspieszone nie odzwierciedlają rzeczywistego zachowania materiału, a poszczególne składniki (popiół lotny, żużel wielkopieczowy, geopolimer) mogą wykazywać odmienne właściwości w różnych warunkach środowiska. Ciekawe badania, opisane w [32], przeprowadził Akinwale, który badał parametry wytrzymałościowe, trwałość oraz odporność na korozję próbek betonu z zastosowaniem dodatków mineralnych w postaci materiałów zastępczych dla cementu. W jego badaniach wykorzystane zostały trzy różne dodatki do betonu: pył krzemionkowy, zmielony żużel wielkopieczowy oraz popiół lotny. Próby trwałości prowadzone były dla różnych poziomów zastąpienia cementu (10–60%), a wyniki porównano z betonem kontrolnym z czystym cementem portlandzkim. Uzyskane wyniki jasno wskazały na to, że odpowiednio dobrane proporcje zawartości dodatków w zastępstwie cementu portlandzkiego (szczególnie dla 10% użytej pyłokrzemionki) przekładają się na: poprawę wytrzymałości, ograniczenie dyfuzji chlorów i siarczanów, oraz zmniejszoną podatność na korozję stali.

#### 4. Podsumowanie

Przegląd dostępnych artykułów i badań jednoznacznie wskazuje, że cement wieloskładnikowy jest nowoczesnym

i proekologicznym rozwiązaniem, mogącym odegrać kluczową rolę w redukcji emisji dwutlenku węgla w budownictwie. Dzięki częściowemu zastąpieniu klinkieru dodatkami mineralnymi, takimi jak popiół lotny, żużel wielkopiecowy, metakaolin, pył krzemionkowy czy wapień, możliwe jest wytwarzanie betonów o znacznie niższym śladzie węglowym, bez rezygnacji z wysokiej jakości i parametrów użytkowych. Dzięki częściowemu zastąpieniu klinkieru dodatkami mineralnymi możliwe jest:

- ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> nawet o 55–65%,
- poprawa mikrostruktury betonu i jego szczelności,
- wysoka wytrzymałość mechaniczna w późniejszych okresach dojrzewania (≥70 MPa po 90 dniach),
- poprawa odporności na mróz oraz działanie agresywnych czynników chemicznych.

Wyniki badań dotyczących trwałości betonów z zastosowaniem cementów wieloskładnikowych, zwłaszcza w zakresie odporności na karbonatyzację i penetrację chlorków, pozostają niejednoznaczne. Można zaobserwować poprawę ochrony stali zbrojeniowej oraz zwiększoną odporność betonu na korozję, podczas gdy inne raporty przedstawiają wzrost podatności na karbonatyzację w przypadku spoiw z dużym udziałem popiołu lotnego i żużla wielkopiecowego. Na podstawie otrzymanych rezultatów można dojść do wniosku, że efekty stosowania cementów o niskim śladzie węglowym są silnie uzależnione od rodzaju i proporcji użytych dodatków oraz wartości współczynnika w/c. Podsumowując, cementy wieloskładnikowe należy uznać za perspektywiczny kierunek rozwoju technologii betonu w kontekście redukcji śladu węglowego, jednak ich szerokie zastosowanie w praktyce inżynierskiej powinno być poprzedzone dalszymi, kompleksowymi badaniami długoterminowymi, które umożliwią jednoznaczną ocenę ich trwałości w różnych warunkach eksploatacyjnych.

#### BIBLIOGRAFIA

- <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/european-green-deal/>
- [https://www.polskicement.pl/content/uploads/2025/01/CEMBUREAU-2050-ROADMAP\\_PL-OK-final.pdf](https://www.polskicement.pl/content/uploads/2025/01/CEMBUREAU-2050-ROADMAP_PL-OK-final.pdf)
- Ziemański Z., Europejski Zielony Ład i odbudowa polskiej gospodarki – szanse i wyzwania, *Sprawy Międzynarodowe* 3/2021, str. 91–110, doi: 10.35757/sm.2021
- Tkachuk O., Europejski Zielony Ład, czyli jak Unia Europejska zamierza uczynić z Europy pierwszy neutralny kontynent dla klimatu? *Politeja* 21, 1(88/1)2024, str. 325–341, doi: 10.12797/Politeja.20.2024.88.1.19
- Piastrzyński P., Cel 2050: beton neutralny emisyjnie, *Stowarzyszenie Producentów Cementu, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 5/2022, str. 50–52
- Sójka A., Europejski Zielony Ład – Unia Europejska od zrównoważonego rozwoju i bezpieczeństwa środowiskowego do ekologizmu, *Studia Administracji i Bezpieczeństwa* 12/2022, doi: 10.5604/01.3001.0015.9683
- Pardo N., Moya J. A., Mercier A., Prospective on the energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the EU cement industry, *Energy* 36, 5/2011, str. 3244–3254, doi: 10.1016/j.energy.2011.03.016
- Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., Emisja dwutlenku węgla w przemyśle cementowym, *Polityka Energetyczna*, Kraków, 2003, str. 367–375
- Górak P., Szklarzyńska M., Lyhs P., Bollmann K., Fontana P., Cementy wieloskładnikowe według projektu nowej normy prPN-EN 197-5 – możliwości aplikacyjne w aspekcie zielonej transformacji sektora cementowego i betonowego na tle doświadczeń niemieckich, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, lipiec-wrzesień 2021, str. 62–64, 66–68
- Środa B., Przemysł cementowy na drodze do Zielonego Ładu, *Budownictwo, Technologie, Architektura, Stowarzyszenie Producentów Cementu*, lipiec-wrzesień 2020, str. 68–74
- Giergiczny Z., Nowe cementy i technologie wytwarzania spoiw alternatywnych, 2012
- Fudalej P., Najduchowska M., Redukcja emisji CO<sub>2</sub> w produkcji sprężonych prefabrykatów betonowych przez zmianę cementu CEM I na cement wieloskładnikowy, *Dni Betonu* 2023, str. 967–982
- Król A., Giergiczny Z., Kuterasińska-Warwas J., Properties of concrete made with low-emission cements CEM II/C-M and CEM VI, *Materials* 13(10)2020, doi: 10.3390/ma13102257
- Giergiczny Z., Fly ash and slag, *Cement and Concrete Research* 124, 10/2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105826
- Kuryś D., Drabczyk M., Ślad węglowy materiałów budowlanych i jego wpływ na emisyjność budynków oraz budowli, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, lipiec-wrzesień 2023, str. 68–73
- Wandoch K., Tałaj M., Nowe cementy wieloskładnikowe CEM II/C-M i CEM VI w betonach wysokowytrzymałościowych i mrozoodpornych, *Materiały Budowlane* 10/2021, str. 33–36, doi: 10.15199/33.2021.10.04
- Król A., Kuterasińska J., Skład i właściwości nowych cementów wieloskładnikowych CEM VI, *Stowarzyszenie Producentów Cementu, Budownictwo, Technologie, Architektura*, lipiec-wrzesień 2015, str. 58–61
- Chładziński S., Garbacik A., Właściwości cementów wieloskładnikowych CEM V z dużą ilością dodatków mineralnych, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, lipiec-wrzesień 2007, str.60–64
- da Silva P.R., de Brito J., Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 49, 7/2016, str. 2749–2766, doi: 10.1617/s11527-015-0683-6
- Bentz D. P., Sato T., de La Varga I., Weiss W.J., Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures, *Cement and Concrete Composites* 34, 1/2012, str. 11–17, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.004
- Vance K., Aguayo M., Oey T., Sant G., Neithalath N., Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin, *Cement and Concrete Composites* 39, 5/2013, str. 93–103, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.028
- PN-EN 197-5 Cement – Część 5: Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M i cement wieloskładnikowy CEM VI
- PN-EN 197-1 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- PN-EN 1992-1-1: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- Gurdián H., García-Alcocel E., Baeza-Brotons F., Garcés P., Zornoza E., Corrosion Behavior of Steel Reinforcement in Concrete with Recycled Aggregates, Fly Ash and Spent Cracking Catalyst, *Materials* 7, 4/2014, str. 3176–3197, doi: 10.3390/ma7043176
- Achenbach R., Raupach M., Passivation of Steel Reinforcement in Low Carbon Concrete Buildings 14(4)2024, str. 895, doi: 10.3390/buildings14040895
- Alwash S. S., AL-Ameeri A. S., Mattar S. G., Assessing the effect of corrosion on optimised low carbon concrete, *Materials Today: Proceedings* 5/2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.653
- Azeez S., Raj A., Saji G., Asokan K., Rohith P. S., Investigation of corrosion behaviour of steel in reinforced concrete with SCM, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2022, str. 3402-3406
- Thummar C., Kondraivendhan B., Modhera C., Review on Rebar Corrosion in Alkali-Activated Concrete Subjected to Chloride-Rich Environment, *IOP Conference Series Earth Environmental Science* 1326, 1/2024, art. 012048, doi: 10.1088/1755-1315/1326/1/012048
- Tałaj M., Assessment of the protective potential of reinforcing steel in low carbon footprint concrete using electrical resistance corrosion monitoring, *Ochrona przed korozją* 1, 9/2024, str. 14–18, doi: 10.15199/40.2024.9.3
- Sirivivatnanon V., Xue C., Khatri R., Long-term reinforcement corrosion in low carbon concrete with a high volume of SCMs exposed to NaCl solutions and field marine environment, *Construction and Building Materials* 393, 8/2023, art. 132071, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132071
- Akinwale A. E., The effect of South African quaternary supplementary cementitious blends on corrosion behaviour of concrete reinforcement in chloride and Sulphate media, 2018

# „Concretne Wyzwanie” – projektowanie składu mieszanek betonowych o niskim śladzie węglowym

„Concrete Challenge” – design low-carbon concrete mixes

mgr inż. Damian Kozak (ORCID: 0009-0001-9947-7161), mgr inż. Małgorzata Wójcik (ORCID: 0009-0006-5852-0246), Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7449

**Streszczenie:** W artykule omówiono problem śladu węglowego betonu. Podkreślono wagę analizy śladu węglowego w dążeniu do zrównoważonego budownictwa. Zwrócono uwagę na jego zależność od składu mieszanki. Dokonano analizy wyników ogólnopolskiego konkursu kół naukowych „Concretne Wyzwanie: Ślad węglowy” organizowanego przez koło naukowe AEDIFICATIO z Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej. Prześledzono wartości śladu węglowego i średnie wytrzymałości na ściskanie betonów zaprojektowanych przez różne zespoły. Analizowano współczynnik proporcji średniej wytrzymałości na ściskanie do śladu węglowego mieszanki i parametry mające największy wpływ na ten parametr.

**Słowa kluczowe:** ślad węglowy, beton niskoemisyjny, wytrzymałość na ściskanie, konkurs.

**Abstract:** The article discusses the issue of concrete's carbon footprint. It emphasises the importance of carbon footprint analysis in the pursuit of sustainable construction. Attention is drawn to its dependence on the composition of the mixture. An analysis was made of the results of the nationwide scientific competition „Concrete Challenge” organised by the AEDIFICATIO scientific club from the Faculty of Civil Engineering and Architecture at the Lublin University of Technology. The carbon footprint values and average compressive strengths of concretes designed by different teams were examined. The ratio of average compressive strength to the carbon footprint of the mixture and the parameters having the greatest impact on this parameter were analysed.

**Keywords:** carbon footprint, low-emission concrete, compression strength, competition.

## 1. Wprowadzenie

Aktualne zmiany klimatyczne mają ogromny wpływ na życie każdego z nas. Aby przeciwdziałać ich negatywnym skutkom, muszą być podjęte szerokie działania. Jednym z nich jest redukcja gazów cieplarnianych. Jak podaje Gruszczynski [1], około 35% światowej emisji gazów cieplarnianych pochodzi z sektora budowlanego, a najczęściej stosowanym materiałem konstrukcyjnym we współczesnym budownictwie jest beton. Branża produkcji betonu i cementu wychodzi naprzeciw współczesnym wyzwaniom, podejmując działania ukierunkowane na ekologię i zrównoważony rozwój. Jak podaje Kaprzyk [2], wielu przedstawicieli branży podjęło działania mające na celu udoskonalenie receptur betonu w celu obniżenia śladu węglowego. Jest to jednak wyzwanie, przed którym muszą stanąć nie tylko producenci betonu, ale również projektanci, wykonawcy, dostawcy oraz świadomi użytkownicy i inwestorzy.

Z tego też względu wśród członków koła Naukowego AEDIFICATIO, działającego od lat na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej, narodził się pomysł, aby wśród studentów, którzy w niedalekiej przyszłości będą pełnili samodzielne funkcje techniczne w budownictwie, popularyzować wiedzę na temat śladu węglowego i rozwijać umiejętność projektowania składu mieszanki betonowej i doboru jej składników tak, aby uzyskać jak najmniejszy ślad węglowy. Pomysł ten

zrealizowany został w formie ogólnopolskiego konkursu dla studentów pod nazwą „Concretne Wyzwanie – Ślad węglowy”

## 2. Istota śladu węglowego

Jak podają Ciula i Furtak [8], kraje, które podpisały i ratyfikowały traktat klimatyczny z roku 2015 (tzw. Porozumienie Paryskie), zobowiązane są do redukcji gazów cieplarnianych w celu minimalizacji globalnego ocieplenia. Miarą emisji różnych gazów cieplarnianych uwalnianych do atmosfery w wyniku procesów technologicznych jest tzw. ślad węglowy, który jest ekwiwalentem wyrażanym przez emisję dwutlenku węgla.

Aby przeciwdziałać wysokiej emisji gazów cieplarnianych na etapie produkcji, muszą być wyłączone czynniki szkodliwe (mające największy ślad węglowy) lub wprowadzone zmiany w zakresie technologii. Osiągnięciu tego celu służy analiza wartości śladu węglowego. Wylizanie śladu węglowego stanowi mechanizm pozwalający na rozpoznanie istotnych zagrożeń środowiska naturalnego i ich neutralizacji. Wspomaga inżynierów i projektantów w aspekcie zrównoważonego rozwoju i dążenia do rozwiązań korzystnych dla środowiska, pomagając w wyborze najbardziej korzystnego ekologicznie rozwiązania. Procedury kalkulacji śladu węglowego mogą dotyczyć przedsiębiorstwa – CCF lub produktu – PCF. Ogólnie stosowane w analizie śladu węglowego PCF są normy ISO 14067 [9], PN-EN 15804 [10],

PAS 2050 [11] oraz Protokół GHG [12]. Wyżej wymienione opracowania różnią się metodyką i zakresem oceny.

Kalkulację śladu węglowego produktu należy rozpocząć od rozpoznania źródeł, ilości i rodzaju emisji gazów cieplarnianych przy jego produkcji. Już w tej fazie pojawiają się trudności dotyczące pozyskania dokładnych danych. Jest to skutkiem różnicy gęstości spalanej paliwa i prowadzonych procesów technologicznych. Spalenie 1 kg węgla kamiennego może wytworzyć 2,2–2,7 kg CO<sub>2</sub>, dlatego też należy przed rozpoczęciem kalkulacji przeprowadzić dokładną analizę gazów wychodzących z emitera bądź w obliczeniach użyć średniej z danych dostępnych w literaturze przedmiotu. W większości praktycznych przypadków stosuje się wartości średnie, co skutkuje błędem na poziomie 20% w początkowej fazie rozważania śladu węglowego.

Deklarowane ślady węglowe produktów zawarte są w EPD (*Environmental Product Declaration*) – dokumencie znanym w Polsce jako „Deklaracja Środowiskowa typu III”. Ślad węglowy wyrobów budowlanych opisany w EPD jest obliczony zgodnie z normą PN-EN 15804 [10] przy uwzględnieniu wydobywania i przetworstwa surowców, przetwarzania wsadu materiałów wtórnych z recyklingu oraz transportu do producenta i produkcji. W normie PN-EN 15804+2a [10] wprowadzono kilka uściśleń, tj. podawanie wartości emisji produktów budowlanych w poszczególnych fazach (pozyskania i transportu surowców, produkcji, transportu na budowę i montażu, użytkowania, rozbiórki, transportu do przetworstwa odpadów, samego procesu przetwarzania, odzysku bądź ewentualnej utylizacji) oraz przedstawienie możliwości do ponownego użycia. W artykule niniejszym ślad węglowy  $CFP_{BET}$  rozumiany jest jako suma iloczynów mas poszczególnych składników w 1 kg mieszanki betonowej i ich śladów węglowych. Obliczany jest na podstawie receptur i danych od producentów według wzoru (1), a wyniki po przeliczeniu na 1 kg mieszanki przedstawiono w tabeli 2:

$$CFP_{BET} = C \times CFP_C + K \times CFP_K + W \times CFP_W + D \times CFP_D \quad (1)$$

gdzie:

$C$  – masa cementu, kg/kg mieszanki,

$K$  – masa kruszywa, kg/kg mieszanki,

$W$  – masa wody, kg/kg mieszanki,

$D$  – masa dodatków i domieszek, kg/kg mieszanki,

$CFP_x$  – wartość śladu węglowego danego składnika w kgCO<sub>2</sub>/t składnika.

### 3. Konkurs „Concretne Wyzwanie: Ślad węglowy”

#### 3.1. Zasady konkursu

Pomysł popularyzacji zagadnienia śladu węglowego wśród studentów zrealizowany został w ramach konkursu „Concretne Wyzwanie”. Pierwotnie adresowany był wyłącznie do studentów Politechniki Lubelskiej i ograniczał się do projektowania betonów o jak najwyższej wytrzymałości na ściskanie z dostępnych materiałów. Po pandemii, między innymi z inicjatywy autorów artykułu, powstał pomysł, aby ponownie zorganizować konkurs, jednak na większą skalę i rozbudowując

zasady. Dzięki zaangażowaniu studentów z Koła Naukowego AEDIFICATIO wraz z opiekunem dr. inż. Michałem Tomczakiem, a także pomocy prorektora PL ds. nauki – prof. dr. hab. inż. Wojciecha Franusa oraz wsparciu finansowemu i merytorycznemu firmy STACHEMA Polska Sp. z o.o. konkurs w nowej formule odbył w się w latach 2024 oraz 2025.

W konkursie mogły brać udział dwuosobowe zespoły, składające się z członków studenckich kół naukowych wyższych uczelni technicznych w Polsce. W dwóch edycjach konkursu wzięły udział zespoły z Politechnik: Białostockiej, Gdańskiej, Lubelskiej, Poznańskiej, Warszawskiej, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie oraz Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technicznego w Szczecinie. Zadaniem konkursowym jest zaprojektowanie, a następnie wykonanie porcji mieszanki betonowej o objętości 3 próbek o wymiarach 150x150x150 mm. Uzyskany beton powinien charakteryzować się jak najwyższym stosunkiem średniej wytrzymałości na ściskanie do śladu węglowego, przy czym w dwóch edycjach konkursu uczestnicy mieli do dyspozycji inne materiały. Rywalizacja składała się z trzech głównych etapów. W pierwszym uczestnicy mieli za zadanie zaprojektować mieszankę betonową na podstawie udostępnionej przez organizatorów listy materiałów wraz z ich śladami węglowymi, gęstościami i średnimi wytrzymałościami cementów po 28 dniach oraz krzywe uziarnienia i tzw. krzywe Walza [14] ukazujące zależność pomiędzy klasami cementu, wskaźnikiem wodno-cementowym, a wytrzymałością betonu na ściskanie. Drugi etap polegał na stawieniu się zespołów w Laboratorium Budownictwa WBIA PL i przygotowaniu próbek według opracowanej przez nie receptury. Natomiast trzeci etap zakładał badanie wytrzymałości na ściskanie próbek oraz wyłonienie zwycięskiego zespołu podczas transmisji na żywo. Dodatkowo odbyło się szkolenie z projektowania niskoemisyjnej mieszanki betonowej. Zostało ono przeprowadzone przez ekspertów z firmy STACHEMA Polska Sp. z o.o. na Wydziale Budownictwa i Architektury PL, było także transmitowane online dla studentów innych uczelni.

#### 3.2. Materiały użyte do komponowania betonu Cement

W edycji konkursu w roku 2024 (receptury I–XII) uczestnicy mieli do dyspozycji dwa cementy:

- cement portlandzki CEM I 52,5R o klasie wytrzymałości 52,5 i wysokiej wytrzymałości wczesnej produkowany przez CEMEX Chełm, powierzchni właściwej według Blaine’a 4620 cm<sup>2</sup>/g, średniej wytrzymałości po 2 dniach 33,4 MPa, a po 28 dniach 62,3 MPa i śladzie węglowym 710 kgCO<sub>2</sub>/t;
- cement pucolanowy CEM IV/B(V) 42,5N – LH/NA (o udziale popiołu lotnego krzemionkowego od 21 do 35%), o klasie wytrzymałości 42,5, normalnej wytrzymałości wczesnej, niskim cieple hydratacji i niskiej zawartości alkaliów; powierzchni właściwej według Blaine’a 5080 cm<sup>2</sup>/g, średniej wytrzymałości po 2 dniach 20,8 MPa, a po 28 dniach – 50,1 MPa i śladzie węglowym 571 kgCO<sub>2</sub>/t.

W drugiej edycji konkursu w roku 2025 (receptury XIII–XXIII) uczestnicy mieli do dyspozycji dwa inne cementy:

- cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5R (o udziale żuźła wielkopieczowego od 21 do 35%), o klasie wytrzymałości 42,5 i wysokiej wytrzymałości wczesnej, średniej wytrzymałości po 28 dniach około 60 MPa i śladzie węglowym 457 kgCO<sub>2</sub>/t;
- cement hutniczy CEM III/A 42,5N (o udziale dodatków od 6 do 20%) o klasie wytrzymałości 42,5 i normalnej wytrzymałości wczesnej średniej wytrzymałości po 28 dniach około 52 MPa i śladzie węglowym 323 kgCO<sub>2</sub>/t.

### Kruszywo

Uczestnicy mieli do dyspozycji kruszywo podzielone na 3 frakcje: 0/2, 2/8 i 8/16 mm.

W pierwszej edycji konkursu frakcję 0/2 mm (receptury I–XII) stanowił piasek rzeczny (oznaczenie PR 0/2) o śladzie węglowym 7 kgCO<sub>2</sub>/t. Jako frakcję 2/8 mm i 8/16 mm uczestnicy mieli do wyboru: grys bazaltowy (oznaczenie GB 2/8 i GB 8/16) o śladzie węglowym 28 kgCO<sub>2</sub>/t lub żwir rzeczny (oznaczenie Ż 2/8 i Ż 8/16) o śladzie węglowym 7 kgCO<sub>2</sub>/t.

W drugiej edycji konkursu (receptury XIII–XXIII) frakcję 0/2 mm stanowił piasek płukany (oznaczenie PP 0/2) o śladzie węglowym 7 kgCO<sub>2</sub>/t. Jako frakcję 2/8 i 8/16 mm można było wybrać grys dolomitowy (oznaczenie GD 2/8 i GD 8/16) o śladzie węglowym 22 kgCO<sub>2</sub>/t lub żwir rzeczny (oznaczenie Ż 2/8 i Ż 8/16) o śladzie węglowym 7 kgCO<sub>2</sub>/t.

### Woda

Wykorzystano wodę wodociągową i przyjęto wartość śladu węglowego równą 0,3 kgCO<sub>2</sub>/t.

### Superplastyfikator

Superplastyfikatory są obecnie powszechnie stosowane jako domieszki do betonu [4], stanowią ponad 75% udziału w rynku wszystkich typów domieszek. Stosowanie domieszek upłynniających jest coraz częściej rozpatrywane jako sposób na zmniejszenie emisji dwutlenku węgla. Umożliwiają one zmniejszenie ilości zużywanego cementu oraz zmniejszenie nakładu energetycznego na układanie i mieszanie betonu. Teoretycznie możliwe jest zmniejszenie ilości spoiwa cementowego i wody zarobowej o 40% bez pogorszenia wytrzymałości betonu (przy zachowaniu niezmiennego *w/c*).

W pierwszej edycji konkursu (receptury I–XII) uczestnicy mogli wykorzystać superplastyfikator PCE STACHEMENT GreenCON 3 (oznaczenie SP I) o śladzie węglowym 1670 kgCO<sub>2</sub>/t, a w drugiej (receptury XIII–XXIII) – superplastyfikator na bazie polikarboksylanów STACHEMENT 2020 (oznaczenie SP II) o śladzie węglowym wynoszącym 689 kgCO<sub>2</sub>/t.

### Popiół lotny i mączka wapienna

Ograniczając emisję CO<sub>2</sub> mieszanki betonowej, coraz częściej wykorzystuje się dodatki mineralne, takie jak popiół lotny czy mączkę wapienną. Jak podaje Górczyński i Owsiak [5] obecnie obserwuje się tendencję do zastępowania czystych cementów

CEM I niskoemisyjnymi cementami z grupy CEM II (zawierającymi dodatki mineralne). Natomiast Chajec i Sadowski [7] zbadali, że możliwe jest zastąpienie nawet 30% cementu jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej bez zmiany konsystencji zaprawy. Z kolei Golewski [6] zaobserwował, że optymalna ilość dodatku popiołów lotnych, przy której beton osiąga maksymalną odporność na pęknięcie, wynosi 17%.

W obydwu edycjach konkursu uczestnicy mogli wykorzystać w swoich recepturach zarówno popiół lotny krzemionkowy (oznaczenie PL) o śladzie węglowym 2 kgCO<sub>2</sub>/t, jak i mączkę wapienną o śladzie węglowym 12 kgCO<sub>2</sub>/t (oznaczenie MW).

### 3.3. Składy mieszanek betonowych i ich ślady węglowe

Składy mieszanek betonowych opracowane przez uczestników obydwu edycji konkursu zestawiono w tab. 1, natomiast ich ślady węglowe obliczone zgodnie z wyrażeniem (1) – w tabeli 2.

### 3.4. Przygotowanie próbek

Uczestnicy stawili się w Laboratorium Budownictwa WBIA PL i wykonali mieszanki według opracowanej przez siebie receptury. Każdy dwuosobowy zespół obserwowany był przez jedną z wyznaczonych przez organizatora osób, w celu weryfikacji postępów i poprawności tworzenia mieszanki (rys. 1). Nad całością wydarzenia czuwał przedstawiciel sponsora. Przygotowana mieszanka została umieszczona w normowych formach i zagęszczona na stole wibracyjnym przez 30 sekund. Okazało się, że niektóre zespoły zaplanowały zbyt małą ilość materiałów potrzebną na wykonanie 3 sześciennych kostek zgodnie z regulaminem. Z tego powodu zespoły odpowiedzialne za receptury IV, XVIII, XX i XXI wykonały po 2 próbki. Tak przygotowane kostki odstawiono do wstępnego dojrzewania w warunkach laboratoryjnych. Po 24 godzinach próbki rozformowano, umieszczono w wannie z wodą o temperaturze 20 ± 2°C w celu kondycjonowania (rys. 2) i poddano procesowi dojrzewania trwającego 28 dni (receptury I–XII) lub 31 dni (receptury XIII–XXIII).

### 3.5. Przeprowadzone badania

Po sporządzeniu mieszanek przeprowadzono badanie konsystencji metodą opadu stożka. Po procesie dojrzewania przystąpiono do badania wytrzymałości na ściskanie zgodnie z PN-EN 12390-3 [13]. Każdą z próbek wyjęto z wanny i osuszono z nadmiaru

**Rys. 1.** Zespół zwycięzczyń konkursu w roku 2025 w trakcie mieszania składników wraz z przewodniczącą Komitetu Organizacyjnego [3]





**Rys. 3.** Wykres słupkowy przedstawiający wartości średnich wytrzymałości na ściskanie próbek i śladów węglowych na 1 t mieszanki

próbek zdecydowanie odbiega od pozostałych, średnia wyniosła 63,23 MPa. Oznacza to, że średnia wytrzymałość z pierwszej edycji i z drugiej nie różnią się znacząco.

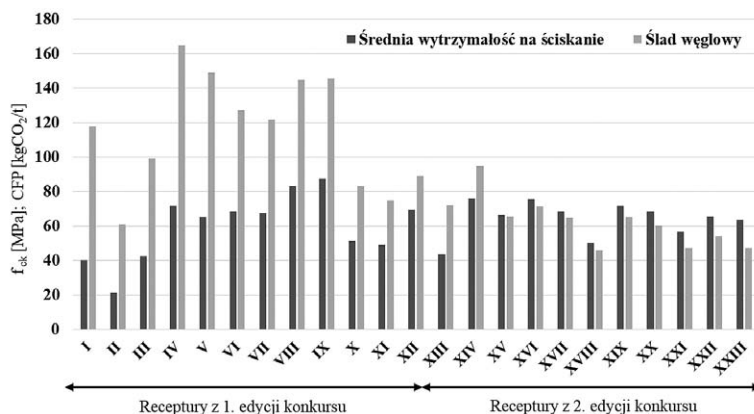
W celu oceny, która z mieszanek była optymalna, a tym samym dla ustalenia zwycięzcy konkursu obliczono stosunek średniej wytrzymałości na ściskanie próbek  $f_{cm}$  do śladu węglowego  $CFP_{BET}$  na 1 t mieszanki:

$$k_{CFP} = \frac{f_{cm}}{CFP_{BET}} \quad (2)$$

Jego wartość dla każdej z receptur przedstawiono na rysunku 4. Pierwsze 12 receptur odnoszą się do pierwszej edycji konkursu i są ustawione w kolejności rosnącego  $k_{CFP}$ . Wartości te mieszczą się w przedziale od 0,3414 do 0,7796 MPa/(kgCO<sub>2</sub>/t) (średnio 0,5266 MPa/(kgCO<sub>2</sub>/t)). Ostatnie 11 receptur odnosi się do drugiej edycji i również są one ustawione od najmniejszego do największego współczynnika, a wartości wahają się od 0,6056 do 1,3515 MPa/(kgCO<sub>2</sub>/t) (średnio 1,0569 MPa/(kgCO<sub>2</sub>/t)).

Wyniki te pokazują, jak ważny dla uzyskania optymalnego stosunku  $k_{CFP}$  jest dobór typu i ilości składników mieszanki, ponieważ nawet mimo niewielkiego wyboru materiałów w ramach każdej z edycji różnica pomiędzy najwyższym i najniższym współczynnikiem danej edycji była ponad dwukrotna i była w obydwu edycjach na podobnym poziomie (w pierwszej edycji różnica wyniosła 128%, a w drugiej 123%).

Z rysunku 4 wynika, że tylko jedna wartość  $k_{CFP}$  z drugiej edycji konkursu jest mniejsza niż najwyższa wartość współczynnika z pierwszej edycji. Ponadto w drugiej edycji tylko dwa betony osiągnęły  $k_{CFP}$  mniejsze niż 1 MPa/(kgCO<sub>2</sub>/t), a z kolei w pierwszej edycji aż pięć betonów nie osiągnęło  $k_{CFP} = 0,5$  MPa/(kgCO<sub>2</sub>/t). Średni współczynnik  $k_{CFP}$  w pierwszej edycji (0,5266 MPa/(kgCO<sub>2</sub>/t)), jest dwukrotnie mniejszy niż w drugiej (1,0569 MPa/(kgCO<sub>2</sub>/t)). Ze względu na to, że w drugiej edycji uczestnicy mieli do dyspozycji inne materiały niż w pierwszej, nasuwa się



wniosek, że duże znaczenie ma wyselekcjonowanie materiałów pod kątem ich parametrów emisyjnych.

Warto jednak podkreślić, że najlepsze receptury (o najwyższym współczynniku  $k_{CFP}$ ) z pierwszej edycji konkursu są zbliżone do najsłabszych receptur z drugiej edycji, co udało się uzyskać pomimo użycia w pierwszej edycji materiałów o większym śladzie węglowym. Można więc powiedzieć, że dobór ilości składników ma duże znaczenie i nawet mając do dyspozycji materiały o wyższym śladzie węglowym można osiągnąć zbliżony lub nawet wyższy współczynnik  $k_{CFP}$  niż w przypadku wykorzystania składników o niższym śladzie węglowym.

W celu oceny wpływu użytych składników na wartość śladu węglowego, w tabelicy 4 pogrupowano składniki i policzono ich procentowy udział w śladzie węglowym danej mieszanki. Zauważyć można, że największy wpływ na ślad węglowy ma cement ponieważ, jego udział w śladzie węglowym wynosi od 78,78 do 92,96%, co daje średnio 87,30%. Natomiast kolejnym w tej kategorii okazuje się kruszywo z udziałem od 4,23 do 18,26%, co daje średnią 9,97%. Pozostają jeszcze dodatki i domieszki z udziałem maksymalnie 4,75% oraz woda z udziałem maksymalnie 0,04%. Można więc stwierdzić, że kluczem do ograniczenia śladu węglowego betonu jest obniżenie śladu węglowego cementu. Widać to również wśród receptur z najwyższym współczynnikiem  $k_{CFP}$  w których ślad węglowy cementu jest jednym z najniższych, a za to rośnie procentowy udział śladu węglowego kruszywa czy nawet wody. Wyjaśnia to również, dlaczego średni ślad węglowy receptur drugiej edycji konkursu jest znacznie mniejszy

**Tabela 4.** Procentowy udział śladu węglowego danej grupy składników w śladzie węglowym danej mieszanki, %

| Receptura | I edycja konkursu  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | I                  | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   |
| Cement    | 89,47              | 87,62 | 91,99 | 92,96 | 88,47 | 88,61 | 91,46 | 86,51 | 86,95 | 88,92 | 89,21 | 79,09 |
| Kruszywo  | 8,44               | 8,06  | 5,16  | 5,30  | 10,09 | 7,13  | 4,23  | 10,67 | 9,68  | 6,31  | 6,98  | 16,46 |
| Dodatki   | 2,07               | 4,28  | 2,82  | 1,73  | 1,43  | 4,25  | 4,29  | 2,80  | 3,35  | 4,75  | 3,79  | 4,44  |
| Woda      | 0,02               | 0,04  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,01  | 0,02  | 0,02  | 0,02  |
| Receptura | II edycja konkursu |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|           | XIII               | XIV   | XV    | XVI   | XVII  | XVIII | XIX   | XX    | XXI   | XXII  | XXIII |       |
| Cement    | 92,75              | 86,22 | 91,22 | 80,89 | 78,78 | 85,01 | 89,78 | 90,13 | 85,80 | 79,88 | 86,20 |       |
| Kruszywo  | 7,08               | 13,07 | 7,46  | 16,77 | 18,26 | 11,82 | 7,64  | 8,21  | 11,64 | 17,24 | 11,62 |       |
| Dodatki   | 0,13               | 0,69  | 1,29  | 2,32  | 2,93  | 3,14  | 2,55  | 1,63  | 2,53  | 2,85  | 22,15 |       |
| Woda      | 0,03               | 0,02  | 0,03  | 0,02  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  |       |

**Rys. 4.** Współczynnik proporcji średniej wytrzymałości na ściskanie do śladu węglowego

niż w pierwszej (cementy w pierwszej edycji miały ślad węglowy 0,710 i 0,571 kgCO<sub>2</sub>/kg, a w drugiej 0,457 i 0,323 kgCO<sub>2</sub>/kg).

Zwracając natomiast uwagę na średnie wytrzymałości betonów to w pierwszej edycji konkursu wyniki zawierały się w zakresie od 21,44 do 87,45 MPa, a w drugiej od 43,66 do 75,80 MPa. Wartości średnie wynoszą odpowiednio 59,75 i 64,10 MPa. Natomiast pomijając beton II z pierwszej edycji, którego średnia wytrzymałość zdecydowanie odbiega od reszty, średnia wyniosła 63,23 MPa. Oznacza to, że średnia wytrzymałość z pierwszej edycji i drugiej nie różni się znacząco, a jedynie zależy od tego w jakim stopniu, projektując receptury, kładziono nacisk na minimalizację śladu węglowego kosztem wytrzymałości.

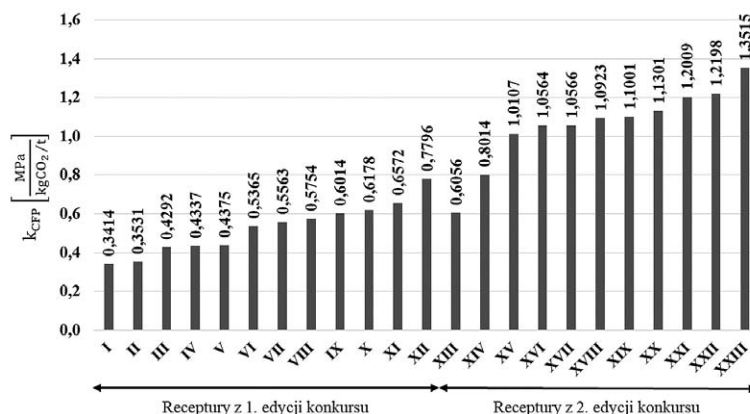
Podsumowując, przedstawione wyniki badań betonów o różnych recepturach i ich ślady węglowe potwierdzają, że aby osiągnąć wysoki współczynnik  $k_{CFP}$  należy obniżyć ślad węglowy, nie tracąc przy tym dużo na wytrzymałości. Jak wynika z badań, zakres pomiędzy maksymalną i minimalną wartością średniej wytrzymałości, którą można uzyskać, jest mniejszy niż zakres pomiędzy maksymalną i minimalną wartością śladu węglowego. Stąd też zauważono, że skupiając się jedynie na średniej wytrzymałości trudniej jest wpłynąć na współczynnik  $k_{CFP}$  niż skupiając się na śladzie węglowym. Wynika to też z faktu, że trudniej jest uzyskać większą średnią wytrzymałość nie zwiększając drastycznie śladu węglowego, niż obniżyć ślad węglowy nie tracąc dużo na wytrzymałości. Ponadto zwiększenie wytrzymałości wiąże się zazwyczaj ze zwiększeniem śladu węglowego mieszanki ponieważ, tak jak ustalono wcześniej, zarówno na wytrzymałość, jak i na ślad węglowy największy wpływ ma cement.

Na redukcję ilości cementu wpływa dodanie superplastyfikatora poprzez zmniejszenie w/c (zwiększa się wytrzymałość mimo mniejszej ilości cementu). Mimo że ślad węglowy superplastyfikatora jest wysoki jego zawartość w mieszance jest na tyle mała, że korzyść z zastosowania mniejszej ilości cementu niweluje jego ślad, co pozwala zredukować ślad węglowy betonu. Kolejnym sposobem na zmniejszenie śladu węglowego jest zastosowanie popiołu lotnego, który w pewnym stopniu może zastąpić cement w mieszance, a jego ślad węglowy jest od kilkunastu do nawet kilkudziesięciu razy mniejszy niż ślad węglowy cementu.

## 5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej analizy wyników dwóch edycji konkursu „Concretne Wyzwanie: Ślad węglowy” sformułowano najważniejsze poniższe wnioski.

- Współczynnik  $k_{CFP}$  stanowi dobrą miarę oceny efektywności ograniczenia ilości śladu węglowego materiału w stosunku do uzyskanych parametrów, integrując właściwości mechaniczne i środowiskowe w jednym parametrze porównawczym.



- Dobór składników betonu i ich ilości może istotnie zmienić współczynnik  $k_{CFP}$ , różnica średniego współczynnika  $k_{CFP}$  w pierwszej i drugiej edycji jest ponad dwukrotna (odpowiednio 0,5266 i 1,0569).
- Optymalizacja ilości składników spowodowała, że różnica pomiędzy największym i najmniejszym współczynnikiem  $k_{CFP}$  wynosiła w pierwszej edycji 128%, a w drugiej 123%.
- Do ograniczenia śladu węglowego w betonie istotne jest obniżenie śladu węglowego cementu, ponieważ ma on największy udział CFP spośród wszystkich składników w mieszance. CFP samego cementu w całkowitym śladzie węglowym betonu w drugiej edycji konkursu wyniósł średnio 86,06% natomiast w pierwszej 88,44% (cementy w pierwszej edycji miały ślad węglowy 710 i 571 kgCO<sub>2</sub>/t, a w drugiej 457 i 323 kgCO<sub>2</sub>/t).
- Kruszywo, domieszki oraz woda mają znacząco mniejszy wpływ na całkowity ślad węglowy.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gruszczyński M., Beton niskoemisyjny – perspektywy rozwoju, Materiały Budowlane 11/2023, str. 55
- [2] Kaprzyk P., Optymalizacja składu mieszanek betonowych stosowanych w prefabrykacji w celu zmniejszenia śladu węglowego, Materiały Budowlane 11/2023, str. 71–72
- [3] Studencka Agencja Fotograficzna: <https://www.facebook.com/safpol> (dostęp: 23.07.2025)
- [4] Łukowski P., Dobór domieszek upłynniających do cementów niskoklinkierowych, Materiały Budowlane 11/2023, doi: 10.15199/33.2023.11.06
- [5] Górczyński M., Owsiak D., Domieszki stosowane w produkcji prefabrykatów betonowych, Materiały Budowlane 1/2024, str. 69–70
- [6] Golewski G. L., Beton modyfikowany popiołem lotnym krzemionkowym poddany ekspozycji niskich temperatur, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2019
- [7] Chajec A., Sadowski Ł., Wpływ jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej na wybrane właściwości cementowych warstw wierzchnich w podłogach zespolonych z podłożem betonowym, Inżynieria i Budownictwo 1/2025, doi: 10.5604/01.3001.0054.9974
- [8] Ciuła M., Furtak M., Problemy śladu węglowego w budownictwie, Materiały Budowlane 12/2023, doi: 10.15199/33.2023.12.16
- [9] ISO 14067, 2018, Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification
- [10] PN-EN 15804, 2020: Zrównoważenie obiektów budowlanych – Deklaracje środowiskowe wyrobu – Podstawowe zasady kategoryzacji wyrobów budowlanych
- [11] PAS 2050, 2012: Assessment of life cycle greenhouse gas emissions
- [12] Protokół GHG, <https://ghgprotocol.org/> (dostęp 17.08.2025)
- [13] PN-EN 12390-3, 2019: Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [14] Walz K., Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164 Juni 1970) und Betondruckfestigkeit, Beton, 20(11)1970, str. 499–503

# O tendencjach w kształtowaniu architektonicznym stadionów do piłki nożnej

## Trends in the architectural design of football stadiums

mgr inż. arch. Aleksandra Torberntsson (ORCID: 0000-0003-3689-8978), Szkoła Doktorska, Politechnika Warszawska, prof. dr hab. inż. Hanna Michalak (ORCID: 0000-0001-5914-4859), Wydział Architektury, Politechnika Warszawska, dr hab. inż. arch. Jacek Kwiatkowski (ORCID: 0000-0001-8221-2194), Wydział Architektury, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7451

**Streszczenie:** Stadiony piłkarskie istnieją od niedawna, chociaż ich wzorce można znaleźć w architekturze starożytnej. Obiekty te ze względu na złożoność funkcjonalną, wymaganą infrastrukturę medialną i instalacyjną, a także dużą liczbę przebywających jednocześnie osób stanowią wyzwanie projektowe i wykonawcze. Wymagania stawiane przez organizacje piłkarskie oraz w zakresie bezpieczeństwa – ze względu na różnice w prawie lokalnym – sprawiają, że każdy obiekt jest indywidualny bez możliwości standaryzacji. Ze względu na duże rozpiętości oraz często skomplikowane formy architektoniczne – stadiony stają się beneficjentem najnowszych technologii w zakresie materiałów budowlanych, instalacji, konstrukcji oraz szeroko rozumianych technologii multimedialnych.

**Słowa kluczowe:** stadion sportowy, UEFA, projektowanie architektoniczne.

**Abstract:** Football stadiums are a relatively recent architectural development, although their formal precedents can be traced to ancient structures. Due to their functional complexity, the extensive media and technical infrastructure required, and the simultaneous presence of large numbers of spectators, these facilities present significant challenges in both architectural design and construction. The standards imposed by football organizations and safety protocols – shaped by variations in local legal frameworks – render each stadium a distinct, non-standardized entity. Furthermore, the need to accommodate large structural spans and often elaborate architectural forms has positioned stadiums as beneficiaries of the most advanced technologies in building materials, mechanical systems, structural engineering, and broadly defined multimedia solutions.

**Keywords:** sports stadium, UEFA, architectural design.

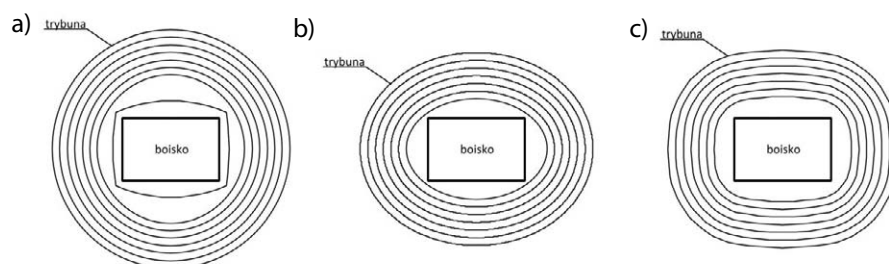
## 1. Wprowadzenie

Stadiony sportowe ze względu na ich rozwiązania funkcjonalne wymagają zastosowania układów nośnych o dużych rozpiętościach, a w konsekwencji zazwyczaj innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych, instalacyjnych, technologicznych. Dodatkowo tę grupę obiektów charakteryzuje indywidualizm w zakresie formy, usytuowania w otaczającej przestrzeni oraz zastosowanych rozwiązań uwzględniających m.in. położenie geograficzne. Na kształtowanie bryły stadionów, wyposażenia instalacyjnego, wykorzystanych materiałów itp. ma wpływ wiele czynników, w tym m.in. uwarunkowania klimatyczne, środowiskowe, ekonomiczne, społeczne, a także dotyczące rozwiązania funkcjonalnego, pojemności, układu komunikacyjnego, zrównoważonego rozwoju, wymogi dotyczące konkretnej dyscypliny sportowej, przeznaczenia obiektu poza okresem wykorzystania głównej funkcji (stadion piłkarski może być wzbogacony o funkcję handlową, hotelową bądź konferencyjną) i wiele innych [1].

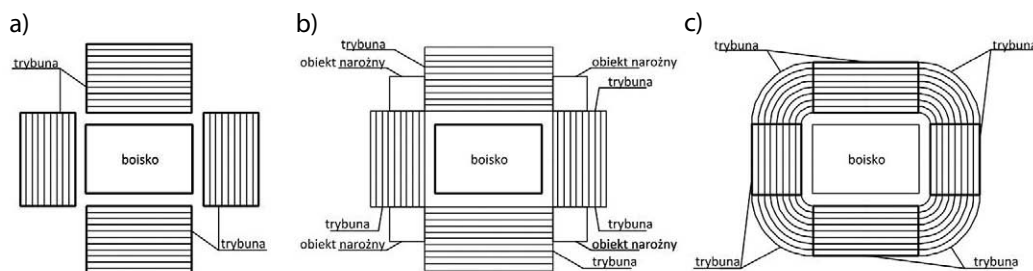
## 2. Uwarunkowania ukształtowania trybun

Rozgrywki sportowe stanowią widowisko podziwiane przez liczne grono widzów skupionych na trybunach stadionu. Schodkowe ukształtowanie widowni przetrwało w nieznacznie zmienionej formie od starożytności. Ukształtowanie udoskonalano na przestrzeni wieków, począwszy od sytuowania ich na istniejących wzgórzach – stadiony w starożytnej Grecji, aż po wolnostojące konstrukcje – amfiteatry i cyrki w starożytnym Rzymie, które stosuje się również we współczesnym budownictwie. Innym aspektem ulegającym zmianie jest sam plan, pierwsze widownie zarówno u Majów, jak i Greków były oparte na planie prostokąta, usytuowane wzdłuż dłuższych jego boków. Wraz z rozwojem budownictwa oraz zwiększającą się liczbą dyscyplin sportowych kształt rzutu podlegał modyfikacji, przyjmując formę wydłużonej podkowy, co stosowano również w cyrkach rzymskich. Kolejnym kamieniem milowym rozwoju budownictwa sportowego było zastosowanie w amfiteatrach rzymskich owalnego planu, dzięki czemu zwiększono zarówno powierzchnię widowni i w konsekwencji liczbę widzów, jak

**Rys. 1.** Schematy trybun łukowych opartych na planie: a) koła, b) elipsy, c) owalu opisanego na prostokącie (opracowanie: A. Torberntsson)



**Rys. 2.** Schematy trybun prostoliniowych rozmieszczonych wzdłuż: a) czterech boków, b) czterech boków z obiektem narożnym, c) czterech boków z narożnikami (opracowanie: A. Torberntsson)



również poprawiono widoczność dla publiczności w płaszczyźnie poziomej. W okresie średniowiecza nie kontynuowano rozwoju w zakresie dorobku starożytnych cywilizacji, natomiast wprowadzono proste i niefunkcjonalne trybuny z miejscami stojącymi [2–6].

Obecnie kształtowanie obiektów sportowych ujmuje m.in. spełnienie wymagań z zakresu zapewnienia odpowiedniej widoczności, prawidłowego układu komunikacyjnego, efektywnej ewakuacji w przypadku różnego rodzaju zagrożeń (pożarowych, terrorystycznych itp.), a także technologicznych, ekonomicznych [5].

We współczesnych stadionach linia przekroju widowni jest kształtowana jako łukowa bądź liniowa o równoległym ustawieniu rzędów w stosunku do krawędzi boiska.

Widownie o geometrii łukowej można podzielić na trzy rodzaje (rys. 1), tj. oparte na planie koła, elipsy i owalu opisanego na prostokącie.

Wśród widowni, których rzędy są rozmieszczone w sposób prostoliniowy, można wyróżnić trybuny (rys. 2):

- w których rzędy są usytuowane wzdłuż czterech boków boiska bez naroży,
- wzdłuż czterech boków z zabudowanymi budowlami o innej funkcji w narożach,
- wzdłuż czterech boków boiska z narożami prostymi lub łukowymi o funkcji widowni [7–8].

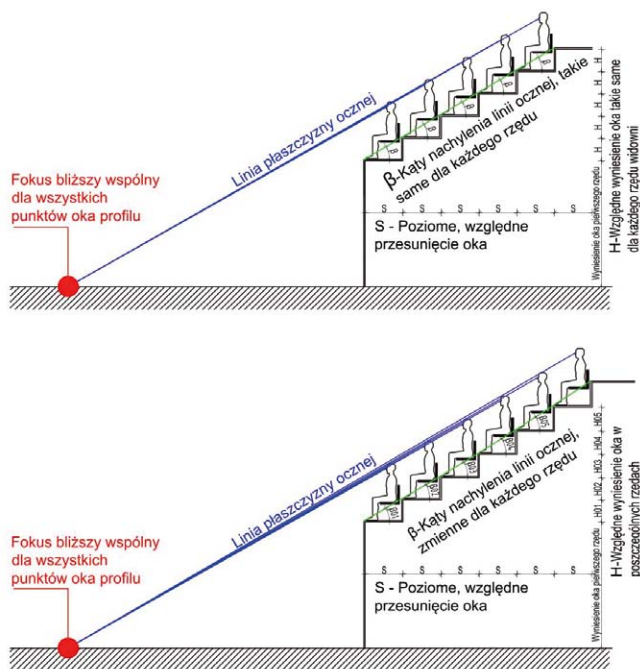
Podstawowe wymagania w zakresie kształtowania obiektów sportowych, w tym dotyczące dobrej widoczności, komfortu indywidualnego miejsca siedzącego, komunikacji wewnętrznej oraz bezpiecznej ewakuacji są zawarte w normie PN-EN 13200-1:2005 „Obiekty widowiskowe. Część 1: Wymagania dotyczące projektowania widowni, Wyszczególnienie”. W normie określono sposób kształtowania przestrzenno-funkcjonalnego trybun w oparciu o parametry geometryczne i antropometryczne. Głębokość rzędu jest zdefiniowana na podstawie dwóch parametrów, tj. wysokości człowieka w pozycji siedzącej lub stojącej oraz szerokości przejścia umożliwiającej wygodną komunikację oraz

bezpieczną ewakuację. Wysokość rzędów zależy od nachylenia linii widzenia fokusu (w przypadku stadionów piłki nożnej jest to linia łącząca punkt oka z punktem położonym na najbliższej linii bocznej boiska), która nie może być zakłócona przez osobę znajdującą się w rzędzie niższym. Istnieją dwa podstawowe sposoby kształtowania przekroju widowni: krzywoliniowy oraz prostoliniowy (rys. 3). W pierwszym z nich punkty oka w następujących po sobie rzędach leżą na krzywej parabolicznej której kształt jest zależny od kilku parametrów, w tym usytuowanie oka pierwszego rzędu (odległość pozioma od punktu fokusu, wysokość wyniesienia), pozostałe profile punktów oka (głębokość rzędów, przewyższenie linii widzenia fokusu, liczba rzędów wyznaczająca głębokość widowni). Drugi typ charakteryzuje się tym, że normalne punkty oka leżą na tej samej płaszczyźnie (płaszczyzna oczna), która z kolei jest równoległa do płaszczyzny wyznaczonej przez krawędzie stopni widowni. Zakłada się, że profil prostoliniowy – można stosować w widowniach zawierających do 30 rzędów [9]. Dlatego w przypadku większej liczby rzędów można zastosować profil prostoliniowy łamany, w którym dzieli się trybunę na fragmenty o profilu liniowym, częściowo nachodzące na siebie (w płaszczyźnie poziomej) [9].

### 3. Warunki obsługi mediów i transmisji telewizyjnej

Transmisja telewizyjna jest nieodzownym elementem zawodów sportowych, z tych względów federacje sportowe – np. FIFA – określają szczegółowe wytyczne dotyczące rozmieszczania elementów infrastruktury medialnej. Zgodnie z wytycznymi FIFA stadion powinien być wyposażony w szereg pomieszczeń służących do dystrybucji mediów i transmisji (rys. 4) [10].

Kamery na stadionie powinny być usytuowane w taki sposób, aby zapewnić poprawny kadr dla danych rozgrywek, bez ograniczenia widoczności widzów. Główna platforma, zawierająca

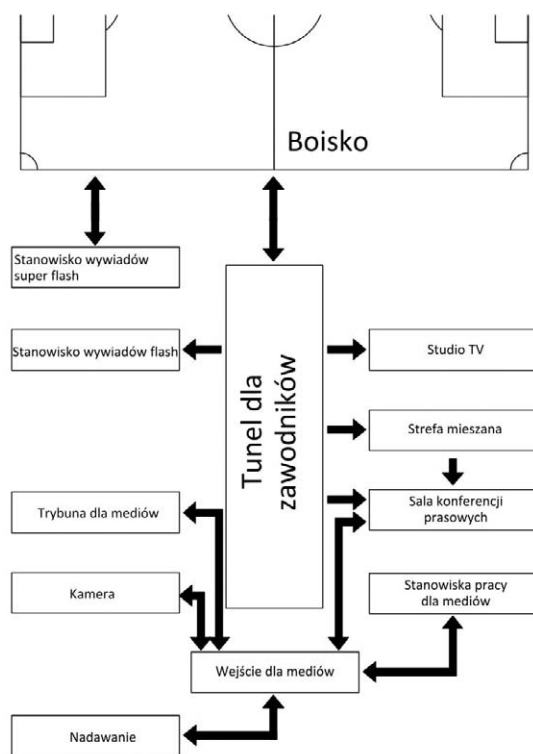


**Rys. 3.** Schemat kształtowania przekroju widowni: a) widownia o przekroju prostoliniowym, b) widownia o przekroju krzywoliniowym (opracowanie: A. Torberntsson)

więcej niż jedną kamerę (liczba zależy od rodzaju zawodów) powinna być usytuowana wzdłuż linii środkowej głównej trybuny w taki sposób, aby uniknąć niekorzystnego działania promieni słonecznych. Na większych stadionach często jest stosowany specjalistyczny system kamer, np. spider-cam (montowanych na konstrukcji dachowej), kamery na wysięgniku (znajdujące się obok boiska). W fazie projektu należy zapewnić usytuowanie połączeń sprzętów transmisyjnych dostosowane do relacjonowania różnych wydarzeń sportowych. W zakresie elementów medialnych na stadionach należy zapewnić tak zwane stanowisko rozmowy kwalifikacyjnej do prowadzenia wywiadów z zawodnikami i trenerami bezpośrednio po meczu. Powinny być one lokalizowane w strefie między boiskiem i szatnią. Istnieją różne formy wywiadów, dlatego zarówno pod względem architektonicznym, jak i instalacyjnym należy dostosować obiekt do poszczególnych aktywności medialnych.

Pierwsza forma przeprowadzania wywiadów odbywa się w tunelu graczy lub obok na tak zwanych stanowiskach wywiadu flash (flash interview positions), które powinno być wyposażone w tło z logiem sponsora, podłogę o wymiarach 2x2,5 m, przestrzeń techniczną dla kamer, okablowanie i tymczasowe oświetlenie.

Przestrzeń służąca dziennikarzom do przeprowadzania wywiadów z zawodnikami po meczach to strefa mieszana wykorzystywana do wywiadów bezpośrednio po meczu. Wówczas jest zlokalizowana między boiskiem i szatniami bądź w przypadku wywiadów po meczu i przebraniu się zawodników między szatnią i wyjściem ze stadionu. Kształtowanie



**Rys. 4.** Schemat pomieszczeń dla mediów na stadionie piłkarskim (opracowanie: A. Torberntsson)

układu komunikacyjnego stadionu powinno uwzględniać separację przestrzeni mediów z przestrzeniami dedykowanymi zawodnikom.

Duże stadiony do piłki nożnej powinny być wyposażone w przestrzenie studyjne do wywiadów telewizyjnych i radiowych. W zależności od gabarytów obiektu oraz rangi zawodów liczba studiów może być inna. Powierzchnia studia telewizyjnego zależy od liczby osób przeprowadzających wywiad, wymagań sprzętowych i zazwyczaj wynosi około 25 m<sup>2</sup>. Dodatkowo takie pomieszczenie powinno mieć zapewniony dostęp do instalacji, takich jak: zasilanie, oświetlenie, wentylacja. W przypadku użytkowania studia do relacjonowania meczu na żywo (tak zwane studia prezentacyjne) powinny one spełniać te same wymogi co studia telewizyjne, ale widok – przez ściankę szklaną – na boisko. Przy czym powinny być zastosowane tafle szkła o dużej rozpiętości, aby uniknąć odbijania światła.

W obrębie trybun powinna być wydzielona strefa dla mediów przeznaczona dla komentatorów do obserwacji i relacjonowania meczu. Ta przestrzeń powinna być usytuowana blisko środkowej, głównej trybuny i mieć zapewnioną dobrą widoczność na boisko. W zależności od wielkości obiektu i klasy przeprowadzanych zawodów zarówno powierzchnia, jak i liczba tych przestrzeni może być zróżnicowana.

W fazie projektowania należy zaplanować usytuowanie stanowisk: prasowych (z biurkami i bez biurek), komentatorskich (otwarte i zamknięte dla komentatorów radiowych), obserwatorskich i dla fotografów. Trybuna dla mediów powinna być zorganizowana w sposób umożliwiający korzystanie

z niej przez osoby z ograniczoną zdolnością poruszania. W przypadku większych obiektów trybunę dla mediów sytuuje się w pobliżu pokoju sterowania (CCR).

Na stadionach powinna być ponadto zapewniona przestrzeń robocza dla pracowników mediów obejmująca przestrzeń do pracy przy biurku, część gastronomiczną, dostęp do klubowych mediów i zawodników. Należy ją lokalizować w okolicach wejść, trybun dla mediów, sal konferencyjnych lub strefy mieszanej.

Każdy stadion powinien mieć salę do przeprowadzania konferencji prasowych (w przypadku niewielkich stadionów może to być sala wielofunkcyjna), zlokalizowaną w pobliżu szatni dla zawodników, strefy mieszanej z oddzielnym wejściem dla graczy. Dodatkowo FIFA precyzuje wyposażenie sali w: podium z biurkiem o wysokości 40–50 cm i pojemności dla 4–6 osób, miejsca siedzące dla prasy skierowane w stronę podium, łączność Wi-fi, platformę z kamerą uniesioną na wysokość podium, oświetlenie stołu głównego dostosowane do technologii transmisyjnej.

Dla fotografów należy zapewnić osobną przestrzeń z pokojem roboczym, pomieszczeniem z szafkami, a na większych stadionach również wydzielone miejsce do naprawy i przechowywania sprzętu. Dla pracujących w obszarze boiska trzeba zapewnić punkty zasilania odpowiednio zabezpieczone przed deszczem i wilgocią.

W pobliżu stadionu należy również zapewnić miejsce dla pojazdów transmisyjnych (ang. Outside Broadcast – OB) z połączeniem z infrastrukturą obiektu. Wielkość kompleksu transmisyjnego zależy od rodzaju wydarzenia sportowego i wynosi od 300 do 2000 m<sup>2</sup>. Trasy kablowe powinny być zaprojektowane w sposób zapewniający bezpieczeństwo użytkowników kibiców, zawodników i pojazdów.

## 4. Wyposażenie instalacyjne

### 4.1. Instalacje oświetleniowe

Współczesne stadiony są zazwyczaj wyposażone w oświetlenie LED [11].

Ze względu na ścisły związek pomiędzy oświetleniem i jakością przekazu telewizyjnego (obecnie 4K) zaczęto poszukiwać nowych rozwiązań w zakresie instalacji oświetleniowych. Organizacje sportowe takie jak UEFA i FIFA określają wytyczne dotyczące oświetlenia.

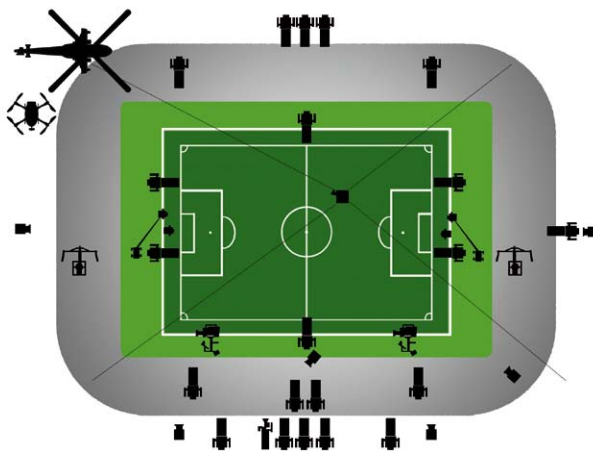
Ze względu na to, że parametry i technologia oświetlenia stadionów jest ściśle związana z jakością transmisji telewizyjnej, wiele wytycznych jest pochodną dobrej widoczności w nagrywanym obrazie. Najistotniejsze parametry w technologii oświetleniowej to: pionowe oświetlenie, poziome natężenie oświetlenia oraz wskaźnik jednorodności (miara równomiernego rozkładu światła na danym obszarze). Z punktu widzenia jakości obrazu pochodzącego z kamer telewizyjnych pierwszy czynnik jest najistotniejszy. Pionowe oświetlenie determinuje poziom szczegółowości, jaki może być transmitowany, w szczególności podczas zbliżeń oraz

rejestracji szczegółowego ruchu. Poziome natężenie oświetlenia ma bezpośredni wpływ na percepcję zarówno zawodników, jak i widzów. Wskaźnik jednorodności ma decydujący wpływ na jakość oświetlenia. Diody LED w przeciwieństwie do klasycznych źródeł światła skuteczniej ograniczają straty spowodowane odbiciem. Zastosowanie w diodach LED soczewek pozwalających na wyższą funkcjonalność stopni koncentracji emitowanego światła (przy minimalnych stratach) pozwala na ograniczenie lub eliminację cieni, ciemnych punktów oraz olśnienia.

Wiele organizacji sportowych formułuje szczegółowe wytyczne dotyczące wskaźnika oddawania barw (CRI), który oddaje podobieństwo światła sztucznego do naturalnego. Zaletą technologii LED jest zgodność z wymaganiami transmisji w zakresie kontrolowania widma emisji, eliminacji promieniowania ultrafioletowego i podczerwonego.

Organizacje takie jak UEFA określają wartości poszczególnych parametrów oświetlenia, w tym m.in. wartość współczynnika migotania, który w przypadku stadionów klasy A nie może przekraczać 5%.

Przy projektowaniu oświetlenia istotne jest odpowiednie usytuowanie kamer (rys. 5). Każdy rodzaj wydarzeń sportowych, a także federacje nakładają minimalną konfigurację tych elementów w celu zapewnienia optymalnej retransmisji. Obecny trend polega na zagęszczaniu liczby kamer, co umożliwi szczegółowe nagranie rozgrywek.



**Rys. 5.** Schemat standardowego usytuowania kamer w czasie rozgrywek Mistrzostw Świata w Piłce Nożnej (42 kamery) (opracowanie: A. Torberntsson)

### 4.2. Instalacje fotowoltaiczne

Coraz częściej stadiony są wyposażane w instalacje mające na celu przetwarzanie energii słonecznej w elektryczną do zaspokojenia zapotrzebowania w tym zakresie całego obiektu. Zastosowanie systemów fotowoltaicznych oraz kolektorów ciepła stały się popularnymi technologiami używanymi na stadionach zarówno nowych, jak i poddawanych modernizacji – istniejących. Panele są zazwyczaj montowane na dachach stadionów, rzadko na powierzchni terenu czy ścianach zewnętrznych.

Pierwszym stadionem piłkarskim na świecie, który wyposażono w panele fotowoltaiczne (w 1993 roku) był Schwarzwald-Stadion zlokalizowany we Fryburgu Bryzgowijskim w Niemczech.

### 4.3. Zrównoważony rozwój

Stadiony coraz częściej są projektowane zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, w tym w zakresie pozyskania energii ze źródeł naturalnych (panele fotowoltaiczne), wykorzystania wody deszczowej do użytku zewnętrznego lub/i wewnątrz obiektu itp.

Obiekt wykorzystujący instalacje przyjazne środowisku to m.in. Stadion Narodowy w Brazylii. Wybudowany w 1974 roku i zmodernizowany w latach 2010–2013 został wyposażony w instalację fotowoltaiczną o mocy 2,5 MW, co jest równoważne z połową jego zapotrzebowania na energię elektryczną. Dach stadionu został pokryty membraną fotokatalityczną, która rozkłada tlenki azotu. Dodatkowo zastosowano instalację wykorzystującą wodę deszczową oraz armaturę o niskim przepływie, aby ograniczyć ilość zużywanej wody [12].

Stadion Narodowy w Tajwanie wybudowany w 2009 roku (arch. Toyo Ito) jest pierwszym stadionem na świecie posiadającym zintegrowane panele fotowoltaiczne (ang. *Building Integrated Photovoltaics* – BIPV). System ten zapewnia zaspokojenie 70% zapotrzebowania obiektu na energię elektryczną. Stadion ma zamontowane niskoemisyjne podwójne szyby, wysokowydajne systemy VAV (*Variable Air Volume*) wentylacji i klimatyzacji, charakteryzujący się zmiennym przepływem powietrza dostosowującym się do zmiennych potrzeb pomieszczeń, VVV (*Variable Water Volume*) polegający na regulacji przepływu wody w zależności od zapotrzebowania na ogrzewanie bądź chłodzenie w budynku, klimatyzacyjne, oświetleniowe, wykończenie wnętrza z materiałów o niskiej zawartości lotnych związków organicznych, zastąpienie 30–40% cementu portlandzkiego w mieszance betonowej żużlem pochodzącym z lokalnej fabryki stali oraz użycie materiałów budowlanych tylko pochodzących z Tajwanu [13].

## 5. Podsumowanie

Na podstawie analizy elementów wyposażenia stadionów do piłki nożnej można sformułować w sposób ogólny tendencje w projektowaniu i kształtowaniu architektonicznym tych obiektów.

Zazwyczaj budynki są wyposażone w najnowsze systemy począwszy od multimedialnych, przez instalacyjne po systemy służące bezpieczeństwu ludzi i mienia.

Obecnie coraz częściej w nowo projektowanych bądź modernizowanych obiektach stosuje się systemy zrównoważonego rozwoju, np. wyposażenie dachu w panele fotowoltaiczne, wykorzystanie wody deszczowej czy instalacji sterujących systemami zapobiegającymi nadmiernemu zużyciu energii (VAV, VVV itp.) oraz wody (armatura o niskim przepływie).

Kolejnym elementem, który podlega coraz większym restrykcjom wynikającym z prawa lokalnego i wymogów federacji piłkarskich jest podnoszenie standardów bezpieczeństwa. Współczesne stadiony mają nowoczesne systemy przeciwpożarowe oraz ochrony przed aktami terrorystycznymi czy wandalizmu.

Stadiony są wyposażone w infrastrukturę umożliwiającą obsługę medialną i telewizyjną, obejmującą m.in. odpowiednie warunki oświetlenia, działania specjalistycznego sprzętu i okablowania do transmisji wysokiej jakości obrazu i dźwięku.

Stadiony piłkarskie ze względu na dużą liczbę osób jednocześnie przebywających w obiekcie, a także złożoność funkcji, systemów bezpieczeństwa, instalacji oraz obsługi medialnej stanowią ogromne wyzwanie projektowe oraz wykonawcze. Interdyscyplinarność projektu wymaga współpracy i koordynacji specjalistów z wielu dziedzin.

Ważnym efektem projektowania i wznoszenia stadionów jest znaczący wpływ na rozwój wielu dziedzin nauki, m.in. budownictwa, inżynierii materiałowej, technologii obliczeniowej i innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, z zakresu pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł itd.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Leyenaar T. J. J., *Ulama the perpetuation in Mexico of the pre-spanish ball game Ullamalitzli*, EJ Brill, Leiden, 1978
- [2] Rosiński M., *Sport i Igrzyska Olimpijskie w Starożytnej Grecji*, Wydawnictwo ArchaeGraph, Łódź, 2019
- [3] Cody Scott Ames, *Rome's seat of passion: An assessment of the archeology and history of the Circus Maximus*, Cogent Arts & Humanities 3(1)2016, str. 1168906, <https://doi.org/10.1080/23311983.2016.1168906>
- [4] Wirszyła R., *Urządzenia sportowe projektowanie i budowa*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1966
- [5] Pawlikowska-Piechotka A., Piechotka M., *Dzieje obiektów sportowych w Europie*, Wydawnictwo Akademii Wychowania Fizycznego, Warszawa, 2017
- [6] Twardowski S., Rostkowski A., Hofman Z., *Projektowanie zespołów sportowych*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1969
- [7] Lenartowicz M., Mosz J., *Stadiony i Widowiska Społeczne przestrzenie sportu*. Wydawnictwo Scholar, Warszawa, 2018
- [8] PN-EN 13200-1:2005, *Obiekty widowiskowe, Część 1: Wymagania dotyczące projektowania widowni*
- [9] Pelczarski Z., *Widownie współczesnych stadionów, Determinanty i problemy projektowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2018
- [10] <https://publications.fifa.com/fr/football-stadiums-guidelines/technical-guideline/main-user-groups/media-and-broadcast/>, dostęp 28.02.2025
- [11] Hermoso- Orzáez R. D., Gago-Calderón A., *LED Lighting Installations in Professional Stadiums: Energy Efficiency, Visual Comfort, and Requirements of 4K TV Broadcast*. Sustainability MDPI 12(18)/2020, <https://doi.org/10.3390/su12187684>
- [12] Hadrovic A., *Stadiums as power plants*. International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation 4/2023, str. 833–846 [https://www.allmultidisciplinaryjournal.com/uploads/archives/20230816214952\\_D-23-150.1.pdf](https://www.allmultidisciplinaryjournal.com/uploads/archives/20230816214952_D-23-150.1.pdf)
- [13] <https://publications.fifa.com/fr/football-stadiums-guidelines/technical-guideline/stadium-guidelines/safety-and-security/> dostęp 7.04.2025
- [14] Michalak H., i Torberntsson A., *On the Architectural Design of Stadiums for the 2022 Men's World Cup in Qatar*, „Teka Komisji Urbanistyki i Architektury. Oddział PAN w Krakowie”, 2023, t.LI, s. 301–319. DOI 10.24425/tkuia.2023.148980

# Promieniotwórcze zagrożenia w budownictwie

## Radioactive hazards in construction

mgr inż. Aleksandra Ubysz (ORCID: 0009-0007-9873-4772), Wydział Chemiczny, dr hab. inż. Marek Maj, prof. uczelni (ORCID: 0000-0002-4151-7298), prof. dr hab. inż. Andrzej Ubysz (ORCID: 0000-0003-3063-0946), Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7452

**Streszczenie:** Jest to artykuł o charakterze popularno-naukowym, którego celem jest zwrócenie uwagi czytelnika na szczególny rodzaj zagrożeń niewidocznych dla człowieka, jakim jest zjawisko promieniowania. Pokazano przykładowe źródła promieniowania naturalnego i sztucznego, które w pewnych okolicznościach mogą nie być obojętne dla zdrowia dla osób znajdujących się w jego zasięgu. Przykłady dotyczą szeroko rozumianego budownictwa, a przedstawione sytuacje mogą występować zarówno na różnych etapach procesu inwestycyjnego, jak i w trakcie użytkowania gotowych budowli. Pokazano źródła naturalnej promieniotwórczości wynikającej z obcowania z pierwiastkami promieniotwórczymi oraz sztuczne generowane przez człowieka zarówno w skali makro jak linie przesyłowe, jak i w mikroskali generowane przez użytkowane w domu przedmioty codziennego użytku.

**Słowa kluczowe:** radon, źródła promieniowania, promieniotwórczość naturalna, promieniotwórczość sztuczna.

**Abstract:** This is a popular science article aimed at drawing the reader's attention to a specific type of threat, invisible to humans like radiation. Examples of natural and artificial radiation sources are presented, which, under certain circumstances, may pose a health risk to people staying within range. The examples cover the broader field of construction, and the situations presented can occur both at various stages of the investment process and during the use of completed buildings. Sources of natural radioactivity resulting from occurrence of radioactive elements are presented, as well as artificial sources generated by humans, both on a macro scale, such as transmission lines, and on a micro scale, generated by everyday household items.

**Keywords:** radon, radiation sources, natural radioactivity, artificial radioactivity.

## 1. Wprowadzenie

Rozpoznając pochodzenie i ewentualne zagrożenia, można w znacznym stopniu złagodzić negatywne skutki takich oddziaływań na człowieka, a nawet patrząc szerzej na żyjące organizmy. Promieniotwórcze zagrożenia w budownictwie można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- radioaktywność naturalna,
- promieniotwórczość będąca następstwem działalności człowieka.

Najbardziej popularnymi źródłami naturalnej radiacji są czynniki geologiczne zawierające pierwiastki promieniotwórcze. Do najbardziej radioaktywnych należą pierwiastki z szóstego i siódmego okresu. Najbardziej rozpowszechnione w przyrodzie są znajdujące się w jednym szeregu promieniotwórczym uran, tor i radon. Ich aktywność radiacyjna ujawnia się zarówno przy procesach wydobywczych, jak i podczas przeróbki (m.in. procesy rozdrabniania, transportu, prefabrykacji), jak również podczas użytkowania gotowych wyrobów, którymi mogą być budownictwo mieszkaniowe, budowle przemysłowe (hale przemysłowe, zbiorniki, siłosy, kominy, etc.), drogi i nasypy. Radiacja będąca konsekwencją struktury geologicznej może wynikać również z warunków posadowienia budowli, gdyż wspomniane pierwiastki promieniotwórcze niejednokrotnie są naturalnym składnikiem gruntu. Radiację naturalną można rozpatrywać również w szerszym kontekście globalnego promieniowania – promieniowanie słoneczne

i kosmiczne, które jest mierzalne na ziemi. Gdy mówi się o promieniowaniu można mieć na uwadze również pole magnetyczne na ziemi, czy emisję termiczną, których źródłem mogą być słońce czy pioruny. Na radiację naturalną jesteśmy praktycznie narażeni, przez większą część naszego życia, jednak w większości przypadków nie wpływa ona ani na jego jakość, a tym bardziej na jego długość.

Promieniotwórczość będąca następstwem działalności człowieka wynika najczęściej z postępu techniki i rozwoju zapotrzebowań człowieka. Większość z nich jest również integralnie związanych z budownictwem, np.:

- reaktory atomowe – zagadnienia dotyczące izolacji na promieniowanie i na temperaturę oraz odporności konstrukcji (materiału) na niniejsze oddziaływania;
- aparatura medyczna (urządzenia rentgenowskie, terapia izotopami, radiochirurgia) – radio izolacje;
- defektoskopy, kamery termowizyjne – urządzenia służące do diagnostyki budowli;
- wtórne źródło emisji w popiołach dodawanych do materiałów budowlanych (np. do betonu);
- składowiska odpadów paleniskowych, tj. popioły, żużel itp.,
- składowiska pokopalniane, składowiska materiałów recyklingowych;
- składowiska odpadów wełny żużlowej.

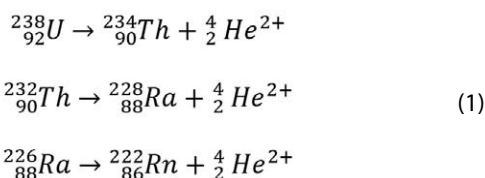
Procesy radiacyjne generowane przez człowieka są w wielu miejscach zbieżne z procesami mającymi miejsce przy radiacjach

naturalnych, jednak w tym przypadku istnieje więcej możliwości ograniczenia szkodliwych oddziaływań na żywe organizmy.

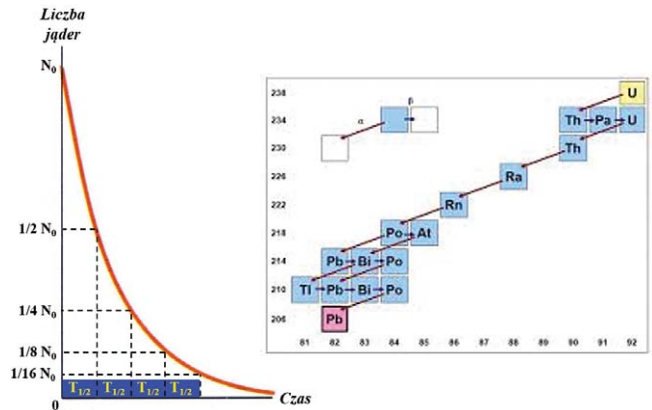
## 2. Procesy radiacyjne

Przebieg procesów radiacyjnych zależy od źródła emisji. W przypadku promieniowania jonizującego źródłem emisji są promieniotwórcze izotopy, które ulegając rozpadowi są źródłem promieniowania  $\alpha$  – emisja jądra helu,  $\beta$  – emisja elektronu i pozytonu oraz antyneutrino i neutrino i  $\gamma$  – emisja wysokoenergetycznego fotonu. Historycznie podstawy do opisu zjawiska i pomiaru radioaktywności dali Maria Skłodowska-Curie, która wprowadziła do chemii fizycznej pojęcie radioaktywności i Henri Becquerel, dla uhonorowania którego jednostkę miary aktywności promieniotwórczej nazwano *bekkerel*. Ich przełomowe odkrycie zostało uhonorowane Nagrodami Nobla (rys. 1). Aktualnie wiadomo, że promieniowanie różni się nie tylko kierunkiem radiacji, ale również energią jonizacji, która przyjmuje wartości od kilkuset kiloelektronowoltów do kilku megaelektronowoltów. Dla porównania promieniowanie rentgenowskie przyjmuje wartości energii jonizacji 10–100 razy mniejsze.

Z promieniowaniem w budownictwie jonizującym najczęściej można mieć kontakt przy pracach związanych z podłożem skalnym lub gruntowym (np. posadowienie budynków, kopalnie kruszyw skalnych, wykorzystanie kruszyw jako materiału budowlanego). W masywach skalnych często występującymi izotopami są jądra należące do łańcuchów uranowego i torowego. Można przy tej okazji wspomnieć, że uran jako pierwiastek został odkryty jeszcze z końcem XVIII wieku przez Martina Klaprotha, a nazwę otrzymał jako upamiętnienie odkrytej kilka lat wcześniej planety, jednak nie rozpoznano jeszcze wówczas jego właściwości promieniotwórczych. W szczególnym przypadku pierwiastek ten może występować w postaci rud uranu (najbardziej znane w Polsce to m.in. na Dolnym Śląsku w okolicach Kletna, Kowar i w Górach Świętokrzyskich). Reakcja rozpadu uranu jest między innymi źródłem promieniowania  $\alpha$ . Podczas tej reakcji emitowane jest jądro helu  ${}^4_2\text{He}^{2+}$  czyli cząstka  $\alpha$ , a strumień tych cząstek jest nazywany promieniowaniem lub radiacją  $\alpha$ . Powstałe w wyniku rozpadu jądro ma liczbę atomową mniejszą o 2, a liczbę masową mniejszą o 4. W strukturach skalnych występuje uran, którego izotopy (liczby masowe 238 – ponad 90% oraz 235 i 234) ulegają radioaktywnemu rozpadowi. Ilustruje to proces rozpadu atomu uranu  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , toru  ${}^{234}_{90}\text{Th}$  i radu  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ :



Produktem rozpadu w ostatniej reakcji (równania 1) jest radon  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  (rys. 4). Pierwiastek ten występuje, podobnie jak i inne pierwiastki promieniotwórcze, w skałach, kopalinach i wodzie. Jednak w przeciwieństwie do pierwiastków promieniotwórczych



**Rys. 1, 2.** Schemat ilustrujący szybkość rozpadu promieniotwórczego [1] i uranowo-radowy szereg promieniotwórczy ilustrujący okresy połowicznego rozpadu izotopów pierwiastków promieniotwórczych [2]

o wyższej liczbie masowej, charakteryzuje go krótki okres połowicznego rozpadu (rys. 1) i duża zdolność jonizująca wynikająca z wysokiej energii i dużej masy cząstki  $\alpha$ .

Nienaturalnym, lecz również szkodliwym źródłem emisji może być promieniowanie elektromagnetyczne. Źródłem tego promieniowania mogą być zarówno sieci przesyłowe, jak i telekomunikacyjne stacje bazowe, a w mniejszym polu oddziaływań np. aparaty rentgenowskie. Ten rodzaj promieniowania ma charakter jonizujący w najwyższym stopniu energetycznym, z tego względu stanowi zagrożenie w mniejszym zakresie. Źródłem pola elektromagnetycznego jest pole elektryczne. Wzajemną relację pomiędzy polem magnetycznym i elektrycznym opisują równania Maxwella:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \vec{B} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

$\vec{B}$  – wektor indukcji pola magnetycznego,

$\vec{E}$  – wektor natężenia pola elektrycznego,

$\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,

$\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni.

Przenikalność magnetyczna i elektryczna są w korelacji z prędkością światła w próżni.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

$c$  – prędkość światła w próżni.

Energia fali elektromagnetycznej jest opisana za pomocą jej częstotliwości  $\nu$  i stałej Planck'a  $h$ . Dla pojedynczego kwantu energii tą opisuje się zależnością:

$$E = h\nu$$

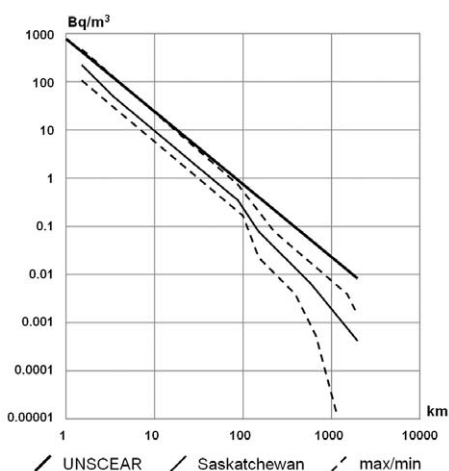
Mając na uwadze zagrożenia dla żywych organizmów, znacznie ma głównie promieniowanie jonizujące, a więc takie, które powoduje jonizację ośrodka, czyli postępując się terminologią chemii fizycznej, takie które powoduje oderwanie co najmniej jednego elektronu od atomu lub cząsteczki lub powoduje wybite go z sieci krystalicznej.

### 3. Przykłady zagrożeń w budownictwie

Aby uniknąć zagrożeń spowodowanych promieniowaniem, można zredukować źródła emisji lub – co jest łatwiejsze i częściej stosowane w praktyce – stosować skuteczne izolacje. Należy też pamiętać, że zjawisko można mieć także wymiar wtórny, jakim jest radiacja wcześniej napromieniowanych materiałów. Największym zagrożeniem jest obecność w miejscach pracy, w których znajdują się cykle technologiczne produkcji materiałów budowlanych wykorzystujących materiały radioaktywne. Materiałem, z którym w szeroko pojętym budownictwie ma się stosunkowo często kontakt, a który jest źródłem naturalnego promieniowania jest radon. Są to kopalnie zarówno głębinowe, jak i odkrywkowe. Niektóre źródła stosują kryteria odniesienia do kopalni rud uranu, gdzie stężenie radonu wynosi nawet 30 000 Bq/m<sup>3</sup> (rys. 3).

Kontakt z radonem nie stanowi w większości przypadków poważnych zagrożeń dla zdrowia i życia ludzkiego. Jednak projektanci, wykonawcy i osoby związane z cyklem produkcyjnym muszą uwzględnić występowanie takich zagrożeń. Statystycznie uważa się, że stężenie radonu w powietrzu wynosi 10–30 Bq/m<sup>3</sup>. Ilość ta odpowiada w przybliżeniu połowie dawki promieniowania oddziaływującej na ludzi z naturalnych źródeł radiacji. Popularność, zwłaszcza w drugiej połowie ubiegłego wieku, prefabrykowanego budownictwa betonowego nie pozostaje bez znaczenia, jeżeli chodzi o promieniowanie. Wprawdzie pomiary wykazują stosunkowo niski poziom promieniotwórczości w cementach, głównie ze względu na występowanie takich radionuklidów, jak: potas <sup>40</sup>K, rad <sup>226</sup>Ra, czy tor <sup>232</sup>Th, to kolejnym źródłem promieniowania może być kruszywo w betonie. Według danych rządowych średnie stężenie radonu w budynkach w Polsce wynosi około 32 Bq/m<sup>3</sup> [4]. Duży wpływ na stężenie radonu w powietrzu i w budynkach ma lokalizacja. W powietrzu wartości stężeń w województwach centralnych i Sudetach wynoszą w powietrzu od około 3–30 Bq/m<sup>3</sup>. W pomieszczeniach zamkniętych, zwłaszcza w betonowych piwnicach stężenia mogą być o wiele wyższe (rys. 6). Na koncentrację radonu w piwnicach ma też znaczenie ciężar własny pierwiastka ( $\rho = 9.73 \text{ kg/m}^3$ ) w porównaniu z ciężarem własnym powietrza ( $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ). Ponadto

**Rys. 3.** Stężenia radonu zaobserwowane w pobliżu kopalni uranu [3]



**Rys. 4.** Produkcja płyt granitowych



w dolnych kondygnacjach i przyziemiach, gdzie płytko zalegające warstwy geologiczne mogą zawierać struktury granitu mogącego zawierać pewne ilości uranu. Z takiego podłoża geologicznego znane są w naszym kraju Góry Izerskie. W wielu krajach kontroluje się poziomy stężenia radonu w pomieszczeniach przeznaczonych do dłuższego pobytu ludzi. Należy zwrócić uwagę również na okres połowicznego rozpadu radonu w następstwie czego występuje silnie toksyczny Polon (rys. 1 i 2). Z badań radiometrycznych otrzymano szacunkowe dane, że podczas szesnastogodzinnego pobytu w pomieszczeniu piwnicznym organizm może otrzymać dawkę 3 mSv. Dla porównania dawka przy prześwietlaniu klatki piersiowej jest na poziomie 0,01 mSv. Chociaż w małych ilościach radiację pochodzącą od radonu uważa się za nieszkodliwą, to jednak podstawowym niebezpieczeństwem jest to, że po przekroczeniu bezpiecznych dawek promieniowanie pochodzące od produktów rozpadu radonu (m.in. Polon) uszkadza łańcuch DNA. Następstwem tej radioaktywnej emisji jest grupa chorób popromiennych, w znacznej części nowotworowych. Podobne skutki może wywołać wdychanie pyłu towarzyszącego procesom wydobywania i obróbki materiału skalnego (głównie granitu). W tym przypadku radioaktywne oddziaływania mogą występować także wewnątrz organizmu. Technologicznym antidotum na te niebezpieczne dla zdrowia oddziaływania są instalacje zraszające tereny kamieniołomów, bądź stanowisk cięcia skalnych bloków (rys. 4), urządzenia odpylające (rys. 5), czy płaszcze na transporterach urobku. Podobnie niekorzystny efekt mogą dawać niektóre technologie spalania, które przy braku pełnej analizy i kontroli tego procesu mogą być kolejnym, niepożądanym źródłem radiacji radonu.

W budownictwie często widocznym nienaturalnym źródłem emisji jest promieniowanie elektromagnetyczne pochodzące z czynnych wież telekomunikacyjnych (rys. 6) i linii przesyłowych, w szczególności wysokiego napięcia (rys. 7), na które narażeni na promieniowanie są zarówno pracownicy budowlani przy pracach montażowych i konserwatorskich, jak i okoliczni mieszkańcy znajdujący się w zasięgu oddziaływania takiej fali elektromagnetycznej. Równie szkodliwe oddziaływania mogą jednak pochodzić także ze źródeł znajdujących się w otoczeniu długotrwałego przebywania osób, na przykład

**Rys. 5.** Nowoczesny węzeł betoniarski z urządzeniami odpylającymi



**Rys. 6.** Anteny na wieży telekomunikacyjnej



instalacje pod- lub natynkowe, a nawet niewinnie wyglądająca koncentracja kabli elektrycznych znajdujących się pod biurkiem. Oddziaływanie takiej fali może również pochodzić ze źródeł znajdujących się w pomieszczeniach. Przykładem może być znajdująca się w pomieszczeniach analitycznych lampa rentgenowska. Podobnie działającym źródłem radiacji, choć o znacznie mniejszej mocy były kineskopy w starych telewizorach i monitorach komputerowych, w których poddana akceleracji wiązka elektronów wysyłana z katody w kierunku anody dawała słaby efekt promieniowania rentgenowskiego. Według niektórych autorów [5] wysokie stężenie radonu może wystąpić także w materiałach wykonanych z żużla i popiołów, jeśli surowiec zawierał podwyższone ilości radu. Wełna żużlowa produkowana jest bowiem z żużla wielkopieczowego stwarzającego duże ryzyko ekshalacji (wydzielania) radonu.

Od dłuższego czasu tematem badań jest odpowiedź na pytanie, czy szkodliwe dla człowieka jest promieniowanie, którego źródłem mogą być takie urządzenia, jak kucharki mikrofalowe (szczególnie w przypadku nieskutecznego ekranowania), telefony komórkowe i technologie bezprzewodowej łączności radiowej (Wi-Fi). Naukowcy twierdzą, że pole EM o natężeniu przekraczającym 1 kV/m oraz częstotliwości przekraczającej  $\nu = 50$  Hz wpływa negatywnie między innymi na krążenie krwi, system nerwowy, hormony, a przede wszystkim na funkcjonowanie mózgu. Jednak opinia Światowej Organizacji Zdrowia oparta na analizie ponad 25 tys. badań naukowych nie potwierdza negatywnych skutków pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez urządzenia telekomunikacyjne na organizm ludzki.

Według niektórych klasyfikacji przyjmuje się siedem nienaturalnych form promieniowania elektromagnetycznego. Promienie gamma mają najwyższą energię i najkrótszą długość fali. Następnie mamy promienie rentgenowskie, światło ultrafioletowe, światło widzialne, promieniowanie podczerwone i promieniowanie mikrofalowe. Wreszcie fale radiowe mają najniższą energię i najdłuższą długość fali.

#### 4. Podsumowanie

W artykule pokazano przykłady naturalnych i sztucznych źródeł promieniowania, z którymi ma kontakt inżynier budownictwa. Promieniotwórczość naturalna powstaje na drodze rozpadów jąder atomowych naturalnych pierwiastków radioaktywnych obecnych w glebie, skałach, powietrzu i wodzie. Jako naturalne źródła promieniowania wskazano na pierwiastki radioaktywne – głównie radon i pierwiastek pierwotny do radonu, jakim jest uran. Na radiację naturalną jesteśmy praktycznie narażeni,

przez większą część naszego życia, jednak w większości przypadków nie wpływa ona ani na jego jakość, a tym bardziej na jego długość. Źródłem radioaktywnym jest znana ilość radionuklidu emitująca promieniowanie jonizujące. Istnieją jednak miejsca, w których silnie jonizujące – promieniowanie  $\alpha$ ,  $\beta^-$  i  $\beta^+$  i słabo jonizujące – promieniowanie  $\gamma$  może stanowić poważne zagrożenie. Dotyczy to w szczególności osób pracujących w przemyśle wydobywczym i przetwórczym skalnych materiałów budowlanych.

Raport [6] potwierdza ścisłą zależność pomiędzy rakiem płuc a dużymi koncentracjami radonu. Raport stwierdza, że radon jest drugą przyczyną raka płuc po paleniu tytoniu. Ochrona przed nadmiernym promieniowaniem po-

**Rys. 7.** Trakcje wysokiego napięcia



chodzącym od radonu powinna polegać na stosowaniu materiałów o stosunkowo

niskim poziomie radioaktywności. Pomieszczenia powinny być dobrze i systematycznie wentylowane. Przy projektowaniu lub adaptacji pomieszczeń należy unikać wykorzystywania pomieszczeń piwnicznych na cele mieszkaniowe.

Technologie produkcji powinny uwzględniać niebezpieczeństwo podwyższenia poziomu emisji radonu do atmosfery wskutek spalania lub wysokiego poziomu zapylenia – stosowanie osłon i filtrów.

Nienaturalne źródła promieniowania stanowią mniejsze bezpośrednie zagrożenia dla zdrowia, jednak czynniki te należy również brać pod uwagę zarówno w planach zagospodarowania terenu, jak i przy projektowaniu wnętrz.

Niektóre z nich istniały zawsze, inne wzrastają wraz z rozwojem techniki. Badania wykazują systematyczny wzrost chorób nowotworowych, alergii, a nawet stanów depresyjnych i zaburzeń w układach krążeniowym, oddechowym i nerwowym. Nowe zadania pojawiają się więc nie tylko dla podążających za postępem specjalistami z techniki, ale również dla ludzi medycyny, a także humanistów.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Rysunek udostępniony przez W. Zierkiewicza ze zbiorów autorskich wykładów z Chemii jądrowej
- [2] Szereg promieniotwórczy uranowo-radowy, <https://www.google.com>
- [3] Raportu EPA's Assessment of Risks from Radon in Homes z 2003 roku sporządzonego przez Environmental Protection Agency w USA
- [4] Główny Inspektorat Sanitarny, Narażenie na radon w pomieszczeniach oraz związane z narażeniem na radon zagrożenie dla zdrowia, Warszawa, 2021
- [5] Kupczewska-Dobecka M., Czerczak S., Konieczko K., Wełna mineralna. Zagrożenia dla użytkowników, stan prawny i zasady bezpiecznego postępowania, Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr. med. J. Nofera, Łódź, 2019
- [6] Impact of new environmental and safety regulations on uranium exploration, mining, milling and management of its waste (Proceedings of a TCM held in Vienna, 14–17 September 1998), 2010

# Przegląd wybranych narzędzi sztucznej inteligencji wykorzystywanych w zarządzaniu realizacją inwestycji budowlanych

## Overview of selected artificial intelligence tools used in the management of construction investment projects

inż. Mikołaj Mosiak (ORCID: 0009-0009-4845-1891), mgr inż. Agata Stec (ORCID: 0009-0005-6460-8263), dr inż. Tomasz Nowobilski (ORCID: 0000-0002-0599-7108), Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7453

**Streszczenie:** Wraz z dynamicznym rozwojem technologii modelowania informacji o budynku (BIM) algorytmy sztucznej inteligencji (AI) znajdują coraz szersze zastosowanie w analizie i wspomaganiu kluczowych procesów realizacji inwestycji budowlanych, obejmujących m.in. planowanie, wytwarzanie dokumentacji, kontrolę jakości oraz zarządzanie ryzykiem. Artykuł przedstawia jakościową analizę porównawczą wybranych rozwiązań AI, koncentrując się na ich mechanizmach technicznych, wymaganiach wdrożeniowych oraz efektach praktycznego zastosowania. W treści pracy omówiono zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego w automatyzacji harmonogramowania, technologii widzenia komputerowego i mapowania 3D w monitorowaniu postępu prac, a także skanowania laserowego w kontroli jakości robót. Przedstawiono również rolę AI w analizie dokumentacji oraz prognozowaniu ryzyka realizacyjnego. Na zakończenie wskazano najważniejsze korzyści oraz ograniczenia związane z wdrażaniem przedstawionych rozwiązań w praktyce.  
**Słowa kluczowe:** sztuczna inteligencja, SI, zarządzanie projektami budowlanymi, uczenie maszynowe, widzenie komputerowe.

**Abstract:** With the rapid development of building information modelling (BIM) technology, artificial intelligence (AI) algorithms are increasingly being used in the analysis and support of key construction investment processes, including planning, documentation production, quality control and risk management. This article presents a qualitative comparative analysis of selected AI solutions, focusing on their technical mechanisms, implementation requirements and practical application effects. The paper discusses the use of machine learning algorithms in scheduling automation, computer vision and 3D mapping technologies in monitoring work progress, as well as laser scanning in quality control. The role of AI in document analysis and implementation risk forecasting is also presented. Finally, the most important benefits and limitations associated with the practical implementation of the presented solutions are indicated.

**Keywords:** artificial intelligence, AI, construction project management, machine learning, computer vision.

## 1. Wprowadzenie

Wraz z dynamicznym rozwojem technologii modelowania informacji o budynku (BIM) algorytmy sztucznej inteligencji (AI) znajdują coraz szersze zastosowanie w analizie i wspomaganiu kluczowych procesów realizacji inwestycji budowlanych. Dzięki narzędziom wykorzystującym algorytmy uczenia maszynowego i analizę dużych zbiorów danych można optymalizować poszczególne etapy przedsięwzięcia budowlanego począwszy od koncepcji, a skończywszy na eksploatacji obiektu. Podczas projektowania, dzięki integracji narzędzi AI do rozwiązań BIM-owych, można m.in. generować w efektywny sposób koncepcje budynków [1] czy optymalizować warianty konstrukcji [2]. W trakcie realizacji robót budowlanych już teraz możliwe jest

wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych (tzw. dronów) [3], kamer [4] lub innych czujników zbierania danych, których sygnały są następnie przetwarzane i analizowane w dedykowanych systemach informatycznych z wykorzystaniem algorytmów AI. Dzięki takim rozwiązaniom możliwe jest m.in. efektywne monitorowanie postępu prac [3], bezpieczeństwa pracy [4] lub dostaw materiałów [5] oraz bezpośredniego połączenia zebranych danych z modelami BIM-owymi. Zarówno w Polsce, jak i na świecie obserwuje się dynamicznie rosnącą w ostatnich latach liczbę wdrożeń rozwiązań wykorzystujących sztuczną inteligencję [6]. Przynosi to wymierne korzyści dla firm, m.in. zmniejszenie kosztów [7], optymalizację harmonogramów [7], minimalizację poziomu ryzyka [8] i zwiększenie efektywności procesów [8].

Celem artykułu jest przeprowadzenie obiektywnego przeglądu wybranych narzędzi wykorzystujących algorytmy sztucznej inteligencji stosowanych w obszarze zarządzania realizacją inwestycji budowlanych. Analizie poddano zarówno ich możliwości i potencjalne obszary zastosowań, jak i ograniczenia wynikające z obecnego stanu rozwoju technologii. Dodatkowo wskazano korzyści, jakie mogą wynikać z implementacji tych narzędzi na etapach projektowych oraz wykonawczych, wraz z ich potencjalnym wpływem na efektywność i bezpieczeństwo procesów budowlanych.

## 2. Zakres badań własnych/metodyka

Przeprowadzone i opisane w artykule badania miały charakter jakościowej analizy porównawczej wiodących komercyjnych narzędzi wykorzystujących algorytmy sztucznej inteligencji, stosowanych w procesie budowlanym. W trakcie analizy przyjęto podejście inżynierskie, koncentrując się na technicznych mechanizmach działania algorytmów i analizowanych rozwiązaniach, wymaganiach wdrożeniowych oraz praktycznych efektach ich zastosowania. Do analiz wybrano rozwiązania reprezentujące kluczowe współczesne kierunki rozwoju AI w budownictwie, tak aby uzyskać przekrojowy obraz aktualnych możliwości technologicznych wspierających planowanie, koordynację i nadzór realizacji robót budowlanych.

## 3. Przegląd wybranych rozwiązań wspieranych przez sztuczną inteligencję

W dalszej części artykułu przedstawiono przegląd wybranych rozwiązań wykorzystujących algorytmy sztucznej inteligencji, stosowanych w kluczowych obszarach zarządzania procesem realizacji inwestycji budowlanych. Na podstawie analizy funkcjonalnej zidentyfikowano cztery dominujące obszary aplikacyjne, obejmujące: planowanie realizacji robót, wytwarzanie

i aktualizację dokumentacji, kontrolę jakości oraz zarządzanie bezpieczeństwem pracy i ryzykiem realizacyjnym (rys. 1).

### 3.1. Optymalizacja procesu planowania realizacji robót budowlanych

Tradycyjne metody harmonogramowania robót budowlanych bazują na manualnym opracowywaniu planów realizacji, które mają najczęściej charakter deterministyczny i scenariuszowy. W praktyce oznacza to, że harmonogramy uwzględniają ograniczoną liczbę wariantów przebiegu procesu budowlanego, nie odzwierciedlając w pełni zmienności warunków organizacyjnych, technologicznych oraz środowiskowych, charakterystycznych dla rzeczywistych projektów budowlanych. Skutkuje to ograniczoną zdolnością do identyfikowania konfliktów zasobowych, wąskich gardeł produkcyjnych oraz konsekwencji opóźnień propagujących się w strukturze harmonogramu. W odpowiedzi na te ograniczenia coraz częściej stosowane są narzędzia wykorzystujące algorytmy sztucznej inteligencji, które wspierają proces planowania poprzez automatyzację generowania harmonogramów oraz symulacyjną analizę dużej liczby potencjalnych scenariuszy realizacji. Zamiast pojedynczego statycznego planu systemy te tworzą wielowariantową przestrzeń rozwiązań, uwzględniającą relacje technologiczne pomiędzy zadaniami, dostępność i alokację zasobów, ograniczenia logistyczne oraz założone kryteria optymalizacyjne, takie jak minimalizacja czasu realizacji, kosztów lub ryzyka. Takie podejście umożliwia menedżerom projektów podejmowanie decyzji na podstawie porównywalnych scenariuszy, a nie pojedynczych, sztywno zdefiniowanych planów.

Przykładem rozwiązania wspierającego generatywne planowanie realizacji robót budowlanych jest ALICE Technologies, czyli platforma przeznaczona do symulacyjnej optymalizacji harmonogramów w środowisku projektów budowlanych [9]. System wykorzystuje algorytmy optymalizacyjne do generowania i analizy tysięcy wariantów sekwencji robót na podstawie



Rys. 1. Schemat integracji algorytmów sztucznej inteligencji z wybranymi obszarami zarządzania procesem realizacji robót budowlanych

zdefiniowanych reguł technologicznych, danych o zasobach oraz ograniczeń projektowych. W praktyce oznacza to modelowanie problemu planistycznego jako zadania wielokryterialnej optymalizacji, a nie prostego harmonogramowania sekwencyjnego.

Warto podkreślić, że algorytmy uczenia maszynowego w tego typu rozwiązaniach nie zastępują wiedzy inżynierskiej, lecz pełnią funkcję wspomagającą – analizują dane historyczne z wcześniejszych projektów w celu estymacji prawdopodobieństwa opóźnień, konfliktów zasobowych lub przekroczeń kosztów, przy założeniu porównywalności kontekstu projektowego. Skuteczność tych prognoz jest silnie uzależniona od jakości, kompletności oraz standaryzacji danych wejściowych, a także od poprawnego sformalizowania reguł technologicznych przez użytkownika. Istotną funkcjonalnością systemów generatywnego planowania jest również automatyczna analiza struktury logicznych zależności pomiędzy zadaniami, umożliwiającą identyfikację błędów modelowych, takich jak cykliczne zależności czy sprzeczne relacje technologiczne, które w klasycznych harmonogramach często pozostają niezauważone aż do etapu realizacji. Należy jednak zaznaczyć, że uzyskane wyniki wymagają każdorazowej weryfikacji eksperckiej, ponieważ algorytmy optymalizacyjne nie uwzględniają w pełni kontekstu organizacyjnego, uwarunkowań kontraktowych ani czynników behawioralnych, które w praktyce istotnie wpływają na przebieg robót budowlanych.

### 3.2. Widzenie komputerowe w procesie wytwarzania dokumentacji budowlanej

Dokumentowanie bieżącego stanu realizacji robót budowlanych wciąż w dużej mierze opiera się na manualnych obchodach terenu budowy oraz sporządzaniu opisowych raportów tekstowych i fotograficznych. Takie podejście charakteryzuje się ograniczoną częstotliwością pozyskiwania danych, subiektywnością obserwacji oraz niską spójnością informacyjną, szczególnie w przypadku rozległych i złożonych inwestycji. W efekcie może to generować nieciągłości w dokumentacji, opóźnionej identyfikacji niezgodności wykonawczych oraz braku systematycznego i aktualnego powiązania rzeczywistego stanu robót z dokumentacją projektową, w tym z modelem BIM.

Zastosowanie algorytmów widzenia komputerowego (ang. *Computer Vision*) umożliwiającą częściową automatyzację procesu gromadzenia, porządkowania i analizy dokumentacji wizualnej terenu budowy. Obrazy i materiały wideo pozyskiwane z m.in. kamer stacjonarnych, mobilnych lub 360° stanowią dane wejściowe dla algorytmów detekcji i klasyfikacji obiektów, które pozwalają na identyfikację elementów konstrukcyjnych, materiałów budowlanych oraz wybranych urządzeń i narzędzi. W połączeniu z metodami rekonstrukcji przestrzennej oraz lokalizacji obrazu w przestrzeni (ang. *spatial mapping*), możliwe jest tworzenie czasowych reprezentacji trójwymiarowych, umożliwiających porównywanie rzeczywistego stanu robót z modelem projektowym. Należy jednak podkreślić, że dokładność tych analiz jest silnie uzależniona od jakości danych wejściowych, warunków oświetleniowych, stopnia

zasłonięcia elementów oraz jednoznaczności geometrii obserwowanych obiektów.

Uzupełnieniem analizy obrazu są algorytmy przetwarzania języka naturalnego (ang. LLM – *Large Language Model*), które mogą wspierać porządkowanie i kategoryzację opisowych uwag zbieranych w terenie budowy. W praktyce modele językowe pełnią funkcję narzędzi wspomagających indeksowanie informacji i wyszukiwanie kontekstowe, a nie autonomicznych systemów decyzyjnych. Skuteczność tego typu rozwiązań zależy od spójności terminologii stosowanej przez użytkowników oraz od właściwego powiązania danych tekstowych z kontekstem przestrzennym i czasowym.

Jednym z komercyjnych rozwiązań wykorzystujących widzenie komputerowe w procesie dokumentowania postępu robót jest OpenSpace – platforma integrująca dokumentację fotograficzną z modelem BIM [10]. Dane wizualne pozyskiwane są m.in. z kamer 360° montowanych na hełmach ochronnych lub innych nośnikach mobilnych, natomiast algorytmy lokalizacji obrazu i mapowania przestrzennego przypisują kolejne obserwacje do konkretnych lokalizacji w modelu projektu. Powstała w ten sposób dokumentacja umożliwia przeglądanie zmian w czasie oraz wizualne porównywanie kolejnych etapów realizacji. Ograniczeniem tego podejścia jest jednak wrażliwość algorytmów na powtarzalną geometrię obiektów, częściowe zasłonięcia oraz brak jednoznacznych cech wizualnych, co może prowadzić do błędów lokalizacji i niejednoznacznych interpretacji stanu robót.

Zbliżone podejście reprezentuje platforma Doxel [11], ukierunkowana na automatyczne monitorowanie postępu prac na podstawie analizy obrazów 360° oraz ich porównania z modelem BIM. System wykorzystuje algorytmy detekcji obiektów do identyfikacji elementów konstrukcyjnych, instalacyjnych i materiałów, a następnie rekonstruuje przybliżoną reprezentację przestrzenną budowy, umożliwiając ocenę stopnia zaawansowania robót w odniesieniu do harmonogramu. Wyniki prezentowane są w postaci klasyfikacji branżowej oraz wskaźników potencjalnych opóźnień. Należy jednak zaznaczyć, że tego typu metryki postępu nie uwzględniają w pełni kontekstu organizacyjnego robót, sekwencji technologicznych ani zależności międzybranżowych, co może prowadzić do uproszczonych lub nadmiernie optymistycznych ocen produktywności.

### 3.3. Kontrola jakości realizacji robót budowlanych

Kontrola jakości robót budowlanych na terenie budowy jest tradycyjnie realizowana poprzez wizualne inspekcje oraz ręczne pomiary wykonywane punktowo przez inspektorów nadzoru. Takie podejście charakteryzuje się ograniczoną powtarzalnością, subiektywnością ocen oraz znaczną czasochłonnością, zwłaszcza w przypadku obiektów o dużej skali lub wysokim stopniu złożoności geometrycznej. Dodatkowym ograniczeniem jest trudność w systematycznym i jednoznacznym porównaniu rzeczywistego stanu wykonania robót z założeniami projektowymi, co w praktyce prowadzi do wykrywania niezgodności dopiero na zaawansowanych etapach realizacji.

Zastosowanie skanowania laserowego (LiDAR) oraz przetwarzania chmur punktów w połączeniu z algorytmami analizy danych umożliwia częściową automatyzację procesu kontroli jakości. Dane przestrzenne pozyskane w postaci gęstych chmur punktów stanowią obiektywną reprezentację geometryczną stanu istniejącego, która może być porównywana z modelem projektowym BIM w celu identyfikacji odchyłeń wymiarowych, błędów montażowych oraz braków elementów. W przeciwieństwie do inspekcji wizualnych, analiza oparta na danych 3D pozwala na całościową ocenę geometrii obiektu, przy zachowaniu wysokiej powtarzalności i precyzji pomiarowej. Należy jednak zaznaczyć, że skuteczność tego podejścia jest uzależniona od jakości rejestracji skanów, poprawnej ich rejestracji w jednym układzie odniesienia oraz od spójności i aktualności modelu BIM.

Przykładem rozwiązania wspierającego automatyzację kontroli jakości robót budowlanych jest Imerse – platforma chmurowa integrująca dane ze skanowania laserowego z algorytmami analizy geometrycznej i porównawczej [12]. System umożliwia automatyczne zestawienie chmur punktów pozyskanych na terenie budowy z modelem BIM projektu, identyfikując niezgodności geometryczne na poziomie elementów konstrukcyjnych oraz instalacyjnych. Takie rozwiązanie znacząco skraca czas kontroli jakości i ogranicza konieczność wykonywania ręcznych pomiarów punktowych.

Należy jednak podkreślić, że rozwiązania typu scan-to-BIM nie eliminują potrzeby interpretacji inżynierskiej wyników analizy. Algorytmy porównawcze operują w zadanych tolerancjach geometrycznych i nie uwzględniają w pełni aspektów technologicznych, materiałowych ani sekwencji wykonawczych. W praktyce oznacza to, że wykryte odchylenia wymagają każdorazowo oceny eksperckiej w kontekście dopuszczalnych tolerancji wykonawczych, etapu realizacji oraz dalszych konsekwencji technologicznych. Ograniczeniem pozostaje również rozróżnienie elementów tymczasowych od docelowych oraz analiza obszarów częściowo zasłoniętych lub niedostępnych dla skanowania.

### 3.4. Zarządzanie dokumentacją, bezpieczeństwem pracy i ryzykiem realizacji inwestycji

Proces realizacji inwestycji budowlanej generuje znaczne wolumeny danych i dokumentacji, obejmujące m.in. rysunki projektowe, specyfikacje techniczne, raporty dzienne, protokoły, dokumentację fotograficzną oraz zapisy korespondencji. Informacje te są często rozproszone pomiędzy wieloma systemami informatycznymi i formatami plików, co utrudnia ich spójne przetwarzanie oraz szybkie pozyskiwanie danych istotnych z punktu widzenia zarządzania realizacją, bezpieczeństwem pracy i ryzykiem projektowym. Ręczne wyszukiwanie i analiza dokumentów są procesami czasochłonnymi, podatnymi na błędy oraz silnie uzależnionymi od doświadczenia i dostępności personelu.

Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego oraz przetwarzania języka naturalnego umożliwia częściową automatyzację analizy dokumentacji. Systemy tego typu realizują

ekstrakcję informacji z dokumentów tekstowych, rysunków oraz raportów, identyfikując kluczowe zapisy dotyczące zakresu robót, niezgodności, ryzyka oraz zdarzeń krytycznych. Równoległe algorytmy widzenia komputerowego analizują obrazy i nagrania wideo z terenu budowy w celu wykrywania potencjalnych zagrożeń bezpieczeństwa pracy, takich jak brak stosowania środków ochrony indywidualnej czy obecność pracowników w strefach niebezpiecznych. Należy jednak podkreślić, że algorytmy te nie dokonują samodzielnej oceny ryzyka, lecz dostarczają sygnałów ostrzegawczych wymagających dalszej interpretacji przez służby nadzoru.

W obszarze zarządzania dokumentacją i ryzykiem projektowym wykorzystywane są również modele predykcyjne, które analizują dane historyczne zrealizowanych inwestycji oraz bieżące informacje projektowe w celu estymacji prawdopodobieństwa wystąpienia opóźnień, przekroczeń budżetu lub kumulacji problemów wykonawczych. Skuteczność tego podejścia jest ściśle zależna od jakości danych wejściowych, stopnia standaryzacji raportowania oraz porównywalności projektów referencyjnych. W praktyce oznacza to, że prognozy mają charakter probabilistyczny i wspierający, a nie deterministyczny. Przykładem komercyjnej platformy integrującej zarządzanie dokumentacją projektową z algorytmami AI jest Procure [13]. System ten oferuje narzędzia automatycznej analizy dokumentów, umożliwiające rozpoznawanie tekstu oraz ekstrakcję kluczowych informacji z rysunków, specyfikacji i raportów. Wykorzystanie algorytmów przetwarzania języka naturalnego pozwala na kategoryzację problemów oraz wyszukiwanie kontekstowe w obrębie dokumentacji projektowej. Funkcje predykcyjne platformy opierają się na analizie wzorców występujących w danych historycznych, jednak ich skuteczność jest ograniczona w przypadku projektów niestandardowych lub realizowanych w odmiennych uwarunkowaniach organizacyjnych i kontraktowych.

Zbliżone podejście reprezentuje Autodesk BIM 360 Construction IQ, będący modulem analitycznym zintegrowanym z platformą BIM 360 [14]. System ten wykorzystuje algorytmy uczenia maszynowego do priorytetyzacji problemów projektowych oraz identyfikacji obszarów podwyższonego ryzyka na podstawie danych z raportów, zgłoszeń niezgodności oraz dokumentacji wizualnej. W zakresie bezpieczeństwa pracy rozwiązanie umożliwia automatyczne wykrywanie wybranych zagrożeń na fotografiach i nagraniach z budowy, takich jak brak środków ochrony osobistej czy niebezpieczne warunki pracy. Wygenerowane oceny ryzyka mają charakter względny i porównawczy, a ich interpretacja wymaga uwzględnienia kontekstu technologicznego, organizacyjnego oraz aktualnego etapu realizacji robót.

## 4. Wnioski

Przeprowadzona analiza wybranych narzędzi wykorzystujących algorytmy sztucznej inteligencji wskazuje, że rozwiązania te stanowią coraz istotniejszy element wspomagający zarządzanie realizacją inwestycji budowlanych, w szczególności

w obszarach planowania, monitorowania postępu, kontroli jakości oraz analizy ryzyka. W porównaniu z tradycyjnymi metodami systemy AI umożliwiają ciągłe przetwarzanie dużych wolumenów danych heterogenicznych oraz ich analizę w ujęciu wielowymiarowym, co sprzyja podejmowaniu decyzji opartych na aktualnych i porównywalnych informacjach, a nie wyłącznie na punktowych obserwacjach.

Jednocześnie należy podkreślić, że efektywność wdrożeń rozwiązań opartych na algorytmach AI jest w wysokim stopniu uzależniona od jakości, kompletności i standaryzacji danych wejściowych, stopnia integracji z istniejącymi systemami informatycznymi, w szczególności środowiskiem BIM oraz od dojrzałości organizacyjnej uczestników procesu inwestycyjnego. W praktyce oznacza to, że narzędzia te nie eliminują potrzeby nadzoru inżynierskiego ani odpowiedzialności decyzyjnej, lecz pełnią funkcję systemów wspomagających, których wyniki wymagają interpretacji eksperckiej i kontekstowej oceny. Zidentyfikowane ograniczenia technologiczne i organizacyjne wskazują również, że obecny etap rozwoju rozwiązań AI w budownictwie należy traktować jako fazę przejściową, w której kluczowe znaczenie ma dalszy rozwój standardów danych, interoperacyjności systemów oraz procedur walidacji wyników algorytmicznych w rzeczywistych warunkach realizacji robót budowlanych. Zestawienie kluczowych zalet i ograniczeń analizowanych rozwiązań przedstawiono w tabeli 1.

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona w artykule analiza potwierdza, że narzędzia wykorzystujące algorytmy sztucznej inteligencji stają się istotnym elementem współczesnego zarządzania procesem inwestycyjnym. Rozwiązania te pozwalają na automatyzację i usprawnienie wielu procesów, w szczególności związanych ze zbieraniem i przetwarzaniem dużych ilości danych. Zdaniem autorów dynamiczny rozwój sztucznej inteligencji w ostatnich latach stwarza istotne możliwości transformacji sektora budowlanego. Ich skuteczne wykorzystanie wymaga jednak świadomego doboru narzędzi, odpowiedniego przygotowania organizacyjnego

oraz pogłębionych badań nad standaryzacją, interoperacyjnością i niezawodnością systemów AI w rzeczywistych warunkach realizacji robót budowlanych.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] He Z., Wang Y. H., Zhang J., Generative AIBIM: An automatic and intelligent structural design pipeline integrating BIM and generative AI, *Information Fusion*, tom 114, 2/2025, doi: 10.1016/j.inffus.2024.102654
- [2] Thorat A., Ushir K., AI-driven optimization of construction project scheduling: Machine learning approaches, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 11, 6/2024, str. 177–182, online, dostęp na: [www.jetir.org](http://www.jetir.org)
- [3] Raheman Mohammed A., Sai Ram Chittoju S., Imran Ahmed M., Abdullah Kamran S., Remote Monitoring of Construction Sites Using AI and Drones, *IARJSET International Advanced Research Journal in Science* 11, 12/2024, doi: 10.17148/IARJSET.2024.111267
- [4] Praneeth S., Gudibandi R., Smart Construction Sites: AI for Safety and Risk Management, *International Journal on Science and Technology* 16, 2/2025
- [5] Gado N. G., AI Revolutionizes Construction Management Building Smarter, Safer, and Efficiently Addressing Industry Challenges, *Engineering Research Journal* 183, 3/2024, str. 302–316, doi: 10.21608/erj.2024.299920.1062
- [6] Kurcusz M., i in., Integrating building information modelling (BIM) into construction: innovations, challenges, and global perspectives, *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura* 23, 10/2024, str. 287–303, doi: 10.22630/aspa.2024.23.22
- [7] Umore C., AI and Construction Project Schedules Efficiency: A Review, *International Journal of Scientific Research and Modern Technology*, 6/2025, str. 89–94, doi: 10.38124/ijrsmt.v4i6.761
- [8] Jayakannan S. M., Real-time dynamic scheduling in construction: An Artificial Intelligence approach, *World Journal of Advanced Research and Reviews* 26, 2/2025, str. 2631–2636, doi: 10.30574/wjarr.2025.26.2.1888
- [9] Best Building Construction Simulation Software: Construction Optioneering, dostęp: 22 grudzień 2025 online, dostęp na: <https://www.alice-technologies.com/construction-optioneering>
- [10] OpenSpace: The Visual Intelligence Platform for Builders, dostęp: 22 grudzień 2025 online, dostęp na: <https://www.openspace.ai/>
- [11] Doxel: Construction's most complete progress tracking, dostęp: 22 grudzień 2025 online, dostęp na: <https://doxel.ai/>
- [12] Home/Construction Management Software/Imerso, dostęp: 22 grudzień 2025 online, dostęp na: <https://www.imerso.com/>
- [13] Construction Analytics Software |Procure, dostęp: 22 grudzień 2025 online, dostęp na: <https://www.procure.com/platform/analytics>
- [14] DOCS Help|Analyze Safety Risk Factors|Autodesk, dostęp: 22 grudzień 2025 online, dostęp na: <https://help.autodesk.com/view/DOCS/ENU/?guid=Construction-IQ-Safety-Risk>

**Tabela 1.** Zalety i ograniczenia stosowania rozwiązań wykorzystujących AI w procesie realizacji inwestycji budowlanych

| Zalety   | Ograniczenia  |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatyzacja analizy dużych zbiorów danych projektowych i wykonawczych</li> <li>• Identyfikacja nieoczywistych współzależności pomiędzy procesami, danymi i zdarzeniami realizacyjnymi</li> <li>• Ograniczenie subiektywności w procesach planowania, kontroli i oceny ryzyka</li> <li>• Możliwość ciągłego monitorowania postępu robót i bieżącej aktualizacji danych</li> <li>• Wsparcie procesów decyzyjnych poprzez analizę wielu wariantów realizacyjnych</li> <li>• Integracja danych terenowych z modelami BIM</li> <li>• Potencjał poprawy poziomu bezpieczeństwa pracy na terenie budowy</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wysokie koszty rozwoju, wdrożenia i utrzymania zaawansowanych narzędzi AI</li> <li>• Silna zależność jakości wyników od kompletności, aktualności i jakości danych uczących</li> <li>• Ograniczona dojrzałość technologiczna części dostępnych rozwiązań</li> <li>• Ryzyko generowania błędnych predykcji przy niewystarczającej reprezentatywności danych</li> <li>• Konieczność integracji z istniejącymi systemami informatycznymi i środowiskiem BIM</li> <li>• Wymóg dostosowania procedur organizacyjnych i kultury pracy do nowych technologii</li> </ul> |

# Wykorzystanie energii słonecznej w budownictwie w celu wzmocnienia efektu kominowego

The use of solar energy in construction to enhance the chimney effect

dr inż. Romana Antczak-Jarząbska (ORCID: 0000-0002-6853-2041), Uniwersytet WSB w Gdańsku

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7454

**Streszczenie:** W niniejszej pracy skoncentrowano się nad jednym ze sposobów intensyfikowania wentylacji grawitacyjnej w budynkach. Podczas badań analizowano działanie wentylacji grawitacyjnej, która wykorzystuje zjawisko zwane efektem kominowym. Rozpatrzony został przypadek, który dotyczył obudowania części komina wystającej ponad połac dachową przesłoną transparentną (szkło). Za pomocą zbudowanej przegrody transparentnej wprowadzono typowy przykład komina słonecznego w budynku. W artykule przedstawiono wpływ budowy komina słonecznego na wzrost prędkości przepływu powietrza wentylacyjnego. W pracy wykazano, że wzrost prędkości przepływu powietrza przekłada się na wzrost wydajności wentylacji (ACH) (ang. *air change rate per hour*).

**Słowa kluczowe:** wentylacja grawitacyjna, nasada kominowa, komin słoneczny, wydajność (ACH), pomiary doświadczalne w budynku.

**Abstract:** This paper focuses on one of the methods of enhancing gravity ventilation in buildings. The study analyzed the operation of gravity ventilation, which utilizes a phenomenon known as the chimney effect. The case considered involved the enclosure of the part of the chimney extending above the roof slope with a transparent cover (glass). A typical example of a solar chimney was introduced into the building using the constructed transparent partition. The article presents the impact of the solar chimney design on the increase in airflow velocity of the ventilation air. The study demonstrates that an increase in airflow velocity leads to an increase in ventilation efficiency (ACH) (air change rate per hour).

**Keywords:** gravity ventilation, chimney cowl, solar chimney, efficiency (ACH), experimental measurements in buildings.

## 1. Wprowadzenie

Tradycja budowlana i realia ekonomiczne w Polsce od lat preferują najtańszy z punktu widzenia inwestycyjnego system wentylacji, mianowicie wentylację naturalną (grawitacyjną), która opiera się wyłącznie na siłach natury. Mechanizmem sprawczym wywołującym przepływ powietrza w mieszkaniach, jak również między wnętrzem budynku a otoczeniem jest różnica ciśnień spowodowana różnicą temperatur powietrza oraz siłą wiatru [1–4].

Człowiek obecnie średnio spędza prawie 90% swojego czasu w pomieszczeniach, dlatego ważne jest aby zapewnić jak najlepsze warunki klimatu wewnętrznego (temperatura 20–23°C i wilgotność 45–60%). Ze względu na wahania cen nośników energii istotne jest również, aby uniezależnić się od ich wpływu. W tym celu zwiększa się zastosowanie zrównoważonych technik takich jak energia słoneczna, energia wiatrowa, czy energia wodna.

Energia słoneczna jest źródłem ogólnie dostępnym, czystym i najbardziej naturalnym z istniejących źródeł energii. Najczęściej jest wykorzystana lokalnie, zaspokajając zapotrzebowanie zwłaszcza na ciepłą wodę. Z punktu widzenia wykorzystania energii promieniowania słonecznego najistotniejszymi parametrami są roczne wartości nasłonecznienia (insolacji) – wyrażające ilość energii słonecznej

padającej na jednostkę powierzchni płaszczyzny w określonym czasie [5].

Przedmiotem badań doświadczalnych i numerycznych był układ wentylacji grawitacyjnej, który najczęściej występuje w budynkach mieszkalnych zlokalizowanych w polskiej strefie klimatycznej. Badania wykonane w rzeczywistym układzie wentylacyjnym stanowiły podstawę do sprawdzenia poprawności działania modelu numerycznego, a następnie do wykonania analizy parametrycznej. Analizę parametryczną podzielono pod względem zmiany szerokości pustki w kominie słonecznym i zmiany współczynnika absorpcji. W każdej parametryzacji sprawdzano prędkości powietrza wentylacyjnego w kanale, które przyjęto jako kryterium poprawy efektu kominowego. Wszystkie symulacje parametryczne zostały przeprowadzone w warunkach ustalonych.

## 2. Energia słoneczna w budownictwie

Efektywność systemów pasywnych zwykle zależy od dostępności promieniowania słonecznego w danym terenie. Poza ukształtowaniem terenu czynnikami mającymi wpływ na dostępność promieniowania słonecznego są lokalne uwarunkowania, np. stopień zacienienia budynku, zanieczyszczenie powietrza itp. [6].

Na podstawie pomierzonych wartości natężenia promieniowania słonecznego z miernika NR LITE2 (Kipp & Zonen) uzyskano natężenie promieniowania słonecznego całkowitego  $I_c$  na powierzchnię horyzontalną. W celu wyznaczenia natężenia promieniowania słonecznego na pozostałe płaszczyzny komina nachylone do płaszczyzny horyzontalnej pod kątem  $90^\circ$ , wykorzystano poszczególne składowe ze wzoru [7]:

$$I_{c,\theta} = I_{b,\theta} + I_{r,\theta} + I_{d,\theta} \quad (1)$$

gdzie:

$I_{c,\theta}$  – natężenie promieniowania całkowitego na płaszczyznę  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ,

$I_{b,\theta}$  – natężenie promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ,

$I_{r,\theta}$  – natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyznę  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ,

$I_{d,\theta}$  – natężenie promieniowania odbitego na płaszczyznę  $[\text{W}/\text{m}^2]$ .

Ze względu na to, że w niniejszej pracy prowadzone były tradycyjnie tylko pomiary natężenia promieniowania słonecznego całkowitego  $I_c$ , niezbędne jest wyodrębnienie poszczególnych składowych. Ostatnią składową wzoru (1) jest natężenie promieniowania odbitego na płaszczyznę  $I_{d,\theta}$ . Promieniowanie odbite jest ściśle powiązane z wartościami albedo powierzchni na jaką pada promieniowanie słoneczne. Promieniowanie odbite ma szczególne znaczenie w przypadku niektórych szerokości geograficznych północnych, gdzie niska wysokość słońca na nieboskłonie wpływa na okresowo występującą pokrywę śnieżną o dużej refleksyjności [8]. Natomiast jak podano w [9], promieniowanie odbite w polskiej strefie klimatycznej z reguły nie ma znaczącego udziału w promieniowaniu całkowitym, w związku z tym w dalszej analizie ten człon zostaje pominięty.

Rozbicie poszczególnych składowych jest istotne ze względu na analizę promieniowania słonecznego na płaszczyzny o różnej orientacji. W tym celu konieczne jest zastosowanie modeli empirycznych pozwalających na oszacowanie udziału składowych w promieniowaniu całkowitym. Jednym z bardziej popularnych modeli pozwalających wyznaczyć udział promieniowania rozproszonego są modele: Hollandsa [10], Erbsa [11], De Miguel i inni [12], czy Orgill i Hollands [13]. Jednak należy pamiętać, że modele empiryczne pozwalające wyznaczyć udział promieniowania rozproszonego w promieniowaniu całkowitym budowane są w oparciu o dane pomiarowe mają, więc silnie lokalny charakter. W związku z tym do oszacowania promieniowania rozproszonego w pracy wykorzystano model zaproponowany przez Włodarczyka [14], który opracował model promieniowania rozproszonego na płaszczyznę horyzontalną dla lokalnych warunków klimatycznych Dolnego Śląska:

$$\begin{cases} f = \frac{I_r}{I} = 1,0 - 0,0786 k_T & \text{dla } k_T \leq 0,23 \\ f = 0,3757 + 6,2602k_T - 20,3920k_T^2 + \\ \quad 22,127k_T^3 - 8,6141k_T^4 & \text{dla } 0,23 < k_T \leq 0,77 \\ f = 0,1792 & \text{dla } k_T > 0,77 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:  $k_T$  [-] współczynnik jasności, który wyznacza się ze stosunku promieniowania całkowitego  $I_c$   $[\text{W}/\text{m}^2]$  na płaszczyznę horyzontalną do promieniowania okołozemskiego  $I_0$   $[\text{W}/\text{m}^2]$  zgodnie ze wzorem [7]:

$$k_T = I_c/I_0 \quad (3)$$

Obliczenie wartości promieniowania słonecznego okołozemskiego wyznaczono na podstawie wzoru [15]:

$$I_0(t) = I_{sc}(t) * \left( 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n(t)}{365}\right) \right) * \left( \begin{array}{c} \sin(\delta(t)) \sin(\phi) \\ + \cos(\delta(t)) \cos(\phi) \cos(\omega(t)) \end{array} \right) \quad (4)$$

gdzie:  $I_{sc}$   $[\text{W}/\text{m}^2]$  scałkowane po czasie równym 1 [h] natężenie promieniowania słonecznego docierającego do zewnętrznych warstw atmosfery.

Wykorzystując powyższy wzór, można było określić udział promieniowania rozproszonego  $I_r$  w promieniowaniu całkowitym  $I_c$  na płaszczyznę horyzontalną.

Powyższe zależności dotyczą promieniowania dla płaszczyzn horyzontalnych, w związku z tym, że w pracy występują płaszczyzny nachylone pod kątem  $90^\circ$  do obliczenia wartości poszczególnych składowych promieniowania całkowitego należy zastosować wskaźnik geometryczny. Wskaźnik geometryczny pozwala na przeliczenie wartości dla płaszczyzny horyzontalnej na płaszczyznę nachyloną pod dowolnym kątem  $\theta$  do poziomu. W takim przypadku dla wyznaczenia promieniowania bezpośredniego i rozproszonego stosuje się zależność [7]:

$$I_{c,\theta} = (I_b * r_b) + (I_r * r_r) \quad (5)$$

gdzie:

$I_{c,\theta}$  – natężenie promieniowania całkowitego na płaszczyznę nachyloną  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ,

$I_b$  – natężenie promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę horyzontalną  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ,

$I_r$  – natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyznę horyzontalną  $[\text{W}/\text{m}^2]$ ,

$r_b$  – wskaźnik geometryczny promieniowania bezpośredniego [-],

$r_r$  – wskaźnik geometryczny promieniowania rozproszonego [-].

Wskaźnik geometryczny promieniowania rozproszonego jest jedynie funkcją kąta  $\theta$  pochylenia płaszczyzny (względem poziomu), na którą pada promieniowanie słoneczne. Wskaźnik wyznacza się z poniższej zależności:

$$r_r = (1 + \cos\theta) / 2 \quad (6)$$

Natomiast wskaźnik geometryczny promieniowania bezpośredniego jest to stosunek natężenia promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę nachyloną do promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę horyzontalną. Wyznacza się go na podstawie wzoru:

$$r_b = \cos\theta / \cos\theta_z \quad (7)$$

Uzyskany pomiar z badań doświadczalnych był wartością natężenie promieniowania słonecznego całkowitego na płaszczyznę horyzontalną. W związku z tym kąt padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną  $\theta_z$  wyznaczono z poniższej zależności:

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta \quad (8)$$

Natomiast w celu wyznaczenia dostępności promieniowania słonecznego na pozostałe płaszczyzny wykorzystano zależność pozwalającą na określenie kąta padania promieniowania słonecznego na rozważaną powierzchnię  $\theta$ .

Ponieważ w analizowanym obiekcie występowały tylko dwa typy powierzchni: horyzontalna i płaszczyzna nachylona pod kątem  $90^\circ$  do poziomu, w związku z tym dla tej drugiej płaszczyzny równanie określające kąt padania promieniowania słonecznego przybrało następującą postać:

$$\cos\theta = -\sin\delta\cos\phi\cos\gamma + \cos\delta\sin\phi\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\gamma\sin\omega \quad (9)$$

gdzie:

$\delta$  oznacza deklinację Słońca,

$\phi$  jest to szerokość geograficzna,

$\gamma$  oznacza kąt azymutalny powierzchni oraz  $\omega$  jest kątem godzinowym położenia Słońca na widnokręgu.

### 3. Model matematyczny

Model systemu wentylacji naturalnej, grawitacyjnej podzielony został na dwie domeny: powietrze i ciało stałe (rys. 1). W opracowanym modelu CFD powietrze traktowane jest jako płyn ściśliwy, lepki, niutonowski. W modelu przyjęto, że powietrze zachowuje się jak gaz doskonały.

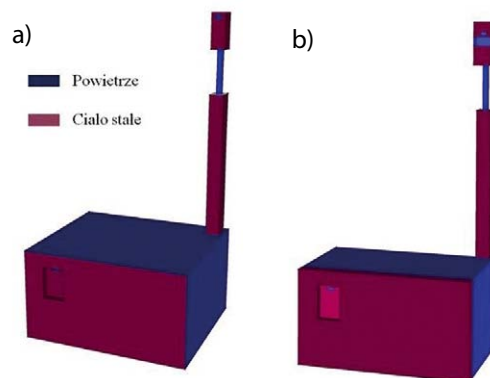
Przenikanie ciepła w ciałach stałych opisane zostało za pomocą równania przewodnictwa cieplnego. Natomiast przepływ powietrza opisany został za pomocą zasady zachowania pędu (równanie Navier-Stokes), zasady zachowania masy i energii. Następnie opisane zostały termofizyczne właściwości modelu.

Podczas przepływu powietrza przez kanał wentylacyjny zazwyczaj tworzą się warunki przejściowe pomiędzy laminarnym a turbulentnym przepływem.

Przepływ powietrza rozpatrzony został na wlocie (wlot do kanału to kwadrat o wymiarach  $0,14 \times 0,14$  m) i scharakteryzowany został przez liczbę  $Re$ , która w tym przypadku wyniosła:

$$Re = 10165.45 [-]$$

W przypadku wystąpienia ruchu turbulentnego w metodach takich jak CFD istnieje konieczność modelowania zjawisk występujących podczas tzw. turbulencji [16]. Popularnym sposobem jest modelowanie zjawisk turbulentnych za pomocą równań Naviera-Stokesa dla uśrednionego ruchu turbulentnego zwanego RANS (ang. *Reynolds Average Navier-Stokes*) [17]. Takie podejście zostało przyjęte również w niniejszej pracy.



**Rys. 1.** Podział systemu wentylacyjnego na domeny ze względu na mechanizmy odpowiadające za wymianę ciepła w analizie CFD: a) model numeryczny typ tradycyjny (typ I), b) model numeryczny typ z przesłoną transparentną – komin słoneczny (typ II)

## 4. Analiza numeryczna

Problem związany z przepływem płynu rozwiązany został poprzez zastosowanie równań RANS. W pracy wykorzystano komercyjne oprogramowanie ANSYS CFX 16.2 [18]. Program wykorzystuje metodę objętości skończonych, która polega na zmianie modelu geometrycznego obszaru przepływu z postaci ciągłej do postaci dyskretniej, jako zbioru komórek o pewnej objętości.

### 4.1. Wpływ siatki na poprawność wyników

Podczas badania wpływu siatki na dokładność wyników dla wszystkich przypadków zastosowano następujące warunki brzegowe:

$$u_{inlet} = 0,48 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$T_{inlet} = 19,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{amb} = 18,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

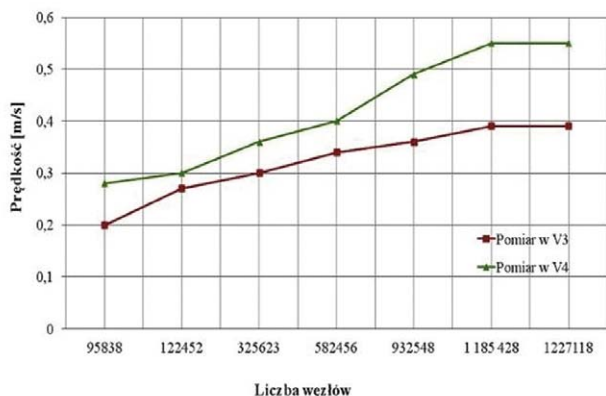
$$h_i = 8.1 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$I_e = 140 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

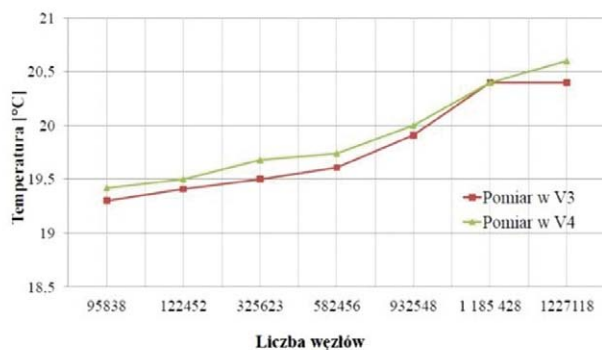
$$h_e = 4.955 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Na podstawie pomierzonej wartości natężenia promieniowania słonecznego zgodnie ze wzorem (1) wyznaczono temperaturę słoneczną. Do walidacji przyjęto okres bezwietrzny ( $v_{wind} = 0$  m/s), który wpłynął na wyznaczenie

współczynnika przejmowania ciepła  $h_c$ . Ponieważ w pracy rozpatrywano zmianę prędkości przepływu powietrza i temperatury, dlatego te wielkości poddano szczegółowej analizie. Uzyskane wyniki wskazują na nieliniowe zależności pomiędzy gęstością siatki a rozpatrywanymi parametrami (rys. 2 i 3).



**Rys. 2.** Wpływ siatki w modelu numerycznym i prędkości przepływu powietrza



**Rys. 3.** Wpływ siatki w modelu numerycznym i temperatury powietrza

Wpływ dokładności wyników na jakość siatki wyznaczono dla 7 przypadków. Symulacje numeryczne w CFD rozpoczęto od 95 838 węzłów, a zakończono na 1 227 118 węzłach. Wyniki pokazały, że wzrost liczby węzłów z 95 838 na 1 227 118 ma zasadniczy wpływ na uzyskany wynik, gdyż różnice w otrzymanych wartościach prędkości sięgają prawie 50% (V3: 48% i V4: 49%). Na podstawie powyższych analiz zauważono, że dopiero liczba węzłów równa 1 185 428 stabilizuje zmienność uzyskiwanych wyników. W związku z tym szczegółowej analizie poddano dokładność wyników dla 2 przypadków: 1 185 428 i 1 227 118 liczby węzłów. Uzyskane wyniki pokazały, że pomiędzy największą rozpatrywaną liczbą węzłów a wartością 1 185 428 jest różnica w otrzymanych wartościach prędkości na poziomie 0,5% (V3: 0,2% i V4: 0,5%). W związku z tym do walidacji przyjęto model o wielkości węzłów równym: 1 185 428. Stwierdzając tym samym, że jakość tej siatki może zapewnić dostatecznie dobre rozwiązania.

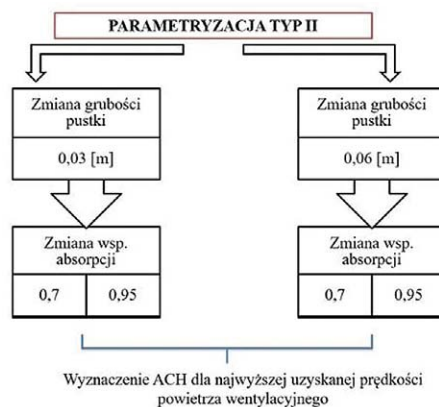
#### 4.2. Założenia wykorzystywane w analizie CFD

Istotnymi parametrami określającymi dokładność symulacji CFD są m.in. zaprojektowana siatka, wybrany model turbulencji oraz przyścienna funkcja ściany itp. W celu sprawdzenia, czy zaprojektowany model CFD jest realistyczny, walidowano otrzymane wyniki z badaniami doświadczalnymi. Analiza otrzymanych wyników numerycznych jednoznacznie wykazała bardzo dużą zgodność wyników otrzymanych na drodze numerycznej z wynikami eksperymentalnymi. Analizę CFD pomieszczenia wraz z kanałem wentylacyjnym wykonano przy następujących założeniach:

- płyn jest ściśliwy,
- właściwości płynu są stałe,
- przepływ płynu jest przepływem turbulentnym,
- zastosowany model turbulencji zawiera standardową definicję opisu warstwy przyściennej,
- pominięto chropowatość kanału,
- założono brak poślizgu płynu.

### 5. Parametryzacja modeli numerycznych

Analizę parametryczną rozpoczęto od sprawdzenia prędkości przepływu powietrza wentylacyjnego w zależności od zmiany szerokości pustki w kominie słonecznym (części wystającej ponad połac dachową). W związku z powyższym analizę przeprowadzono dla trzech szerokości pustki w kominie (4 cm – wartość referencyjna, 3 i 6 cm). Dla każdej szerokości pustki w kominie przeprowadzono analizę wpływu współczynnika absorpcji na prędkość powietrza wentylacyjnego w kanale. Wynikiem końcowym parametryzacji było określenie wydajności wentylacji naturalnej poprzez wyznaczenia największej wartości ACH (krotność wymiany powietrza) dla całego układu wentylacyjnego. Sposób prowadzenia parametryzacji został przedstawiony na rysunku 4.



**Rys. 4.** Sposób prowadzenia parametryzacji dla kominia słonecznego

Analizy numeryczne przeprowadzono dla warunków klimatu zewnętrznego odpowiadającego warunkom przyjętym do walidacji modelu (TYP II), różnice podczas parametryzacji modelu polegały na uwzględnieniu różnych współczynników absorpcji  $\alpha = 0,7$  lub  $\alpha = 0,95$ :

$$u_{inlet} = 0,48 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$T_{inlet} = 19,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$V_{wind} = 0 \text{ [m/s]}$$

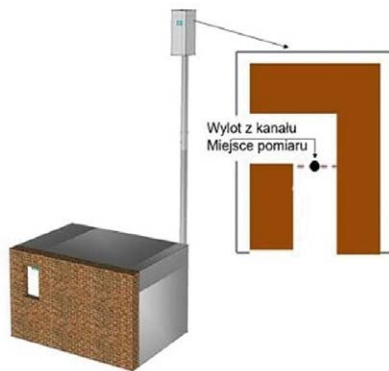
$$T_{amb} = 18,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h_i = 8,1 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

$$I_e = 140 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

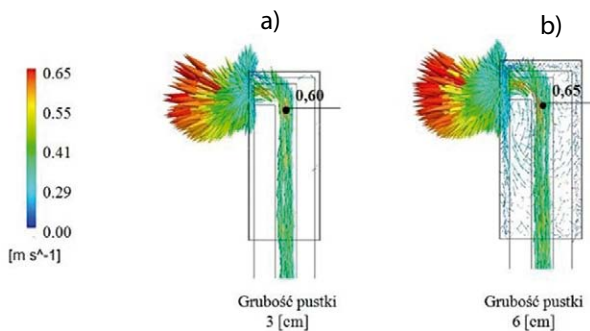
$$h_e = 4,955 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

Wpływ zmiany szerokości pustki analizowano poprzez pomiar prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału (rys. 5).



**Rys. 5.** Miejsce pomiaru powietrza wentylacyjnego przyjętego do analizy parametrycznej

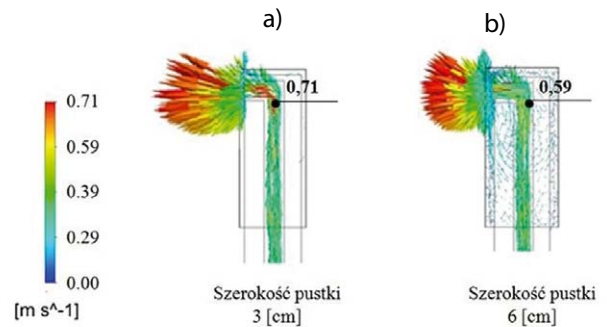
Analiza numeryczna zmiany szerokości pustki wyrażona poprzez profile prędkości powietrza wentylacyjnego w kanale w zależności od współczynnika absorpcji, kształtuje się następująco: na rysunku 6 przedstawiono profile prędkości powietrza wentylacyjnego w kanale dla wartości współczynnika  $\alpha = 0,7$ .



**Rys. 6.** Profile prędkości powietrza wentylacyjnego w kanale przy uwzględnieniu zmiany szerokości pustki powietrznej dla wartości współczynnika  $\alpha = 0,7$

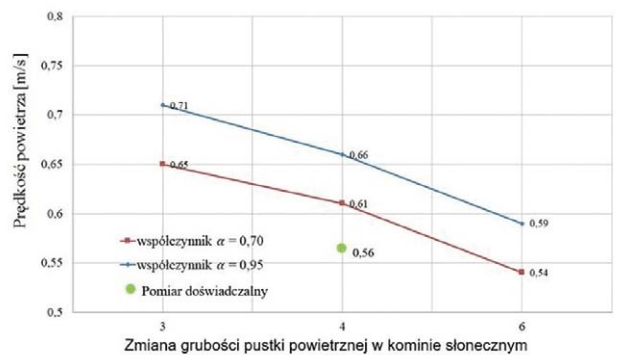
Analiza numeryczna zmiany szerokości pustki wyrażona poprzez profile prędkości powietrza wentylacyjnego w kanale

w zależności od współczynnika absorpcji, kształtuje się następująco: na rysunku 7 przedstawiono profile prędkości powietrza wentylacyjnego w kanale dla wartości współczynnika  $\alpha = 0,95$ .



**Rys. 7.** Profile prędkości powietrza wentylacyjnego w kanale przy uwzględnieniu zmiany szerokości pustki powietrznej dla wartości współczynnika  $\alpha = 0,95$

Wyniki z analizy numerycznej uwzględniającej zmianę grubości ocieplenia kanału wentylacyjnego przedstawia się w sposób następujący (rys. 8).



**Rys. 8.** Profil prędkości przepływu powietrza na wylocie z kanału wentylacyjnego przy uwzględnieniu różnych grubości ocieplenia kanału

Średnia wartość prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału (rys. 8) dla wartości referencyjnej (z 4 cm pustką powietrzną) wynosiła dla współczynnika  $\alpha = 0,70$ , prędkość  $V = 0,61$  m/s, natomiast dla współczynnika  $\alpha = 0,95$  prędkość  $V = 0,66$  m/s przy czym wartość uzyskana z pomiarów doświadczalnych wynosiła  $V = 0,56$  m/s. Zmiana współczynnika absorpcji dla wartości referencyjnej spowodowała wzrost prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału o 8%. Odpowiednio dla grubości pustki 3 cm średnia wartość prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału wynosiła dla współczynnika  $\alpha = 0,70$  prędkość  $V = 0,65$  m/s, natomiast dla współczynnika  $\alpha = 0,95$  prędkość  $V = 0,71$  m/s. Zmiana współczynnika absorpcji dla grubości pustki 3 cm spowodowała wzrost prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału o 9%. Odpowiednio dla grubości pustki 6 cm średnia wartość prędkości

powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału wynosiła dla współczynnika  $\alpha = 0,70$  prędkość  $V = 0,54$  m/s, natomiast dla współczynnika  $\alpha = 0,95$  prędkość  $V = 0,59$  m/s. Zmiana współczynnika absorpcji dla grubości pustki 6 cm spowodowała wzrost prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału o 9%. Na podstawie analizy numerycznej zauważono, że zwiększenie pustki powietrznej z 4 do 6 cm zmniejszyło prędkość powietrza w kanale o ok 12%. Natomiast zmniejszenie pustki powietrznej z 4 do 3 cm spowodowało zwiększenie prędkość powietrza w kanale o ok. 7%. Z kolei pomalowanie transparentnej przesłony komina słonecznego na czarno i zmniejszenie pustki powietrznej z 4 na 3 cm spowodowało zwiększenie prędkości powietrza w kanale nawet o ok 16%.

## 6. Podsumowanie

Analiza numeryczna zmiany szerokości pustki wyrażona poprzez profile prędkości powietrza wentylacyjnego w kanale w zależności od współczynnika absorpcji pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

- zmiana współczynnika absorpcji (z  $\alpha = 0,70$  na  $\alpha = 0,95$ ) dla wartości referencyjnej (z 4 cm pustką powietrzną) spowodowała wzrost prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału o 8%,
- zmiana współczynnika absorpcji (z  $\alpha = 0,70$  na  $\alpha = 0,95$ ) dla grubości pustki 3 cm spowodowała wzrost prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału o 9%,
- zmiana współczynnika absorpcji (z  $\alpha = 0,70$  na  $\alpha = 0,95$ ) dla grubości pustki 6 cm spowodowała wzrost prędkości powietrza wentylacyjnego na wylocie z kanału o 9%,
- na podstawie analizy numerycznej zauważono, że zwiększenie pustki powietrznej z 4 do 6 cm zmniejszyło prędkość powietrza w kanale o ok 12%. Natomiast zmniejszenie pustki powietrznej z 4 do 3 cm spowodowało zwiększenie prędkości powietrza w kanale o ok 7%. Z kolei pomalowanie transparentnej przesłony komina słonecznego na czarno i zmniejszenie pustki powietrznej z 4 na 3 cm spowodowało zwiększenie prędkość powietrza w kanale nawet o ok 16%,
- analizując wydajność wentylacji grawitacyjnej (ACH) dla różnych szerokości pustki powietrznej w kominie słonecznym

i w przypadku zmiany współczynnika absorpcji zanotowano wzrost ACH w zależności od grubości od 0,08% do 0,09%. Porównując ACH pomiędzy skrajnymi wartościami  $ACH_{max} = 0,81$  1/h i  $ACH_{min} = 0,61$  1/h uzyskano również ok. 30% wzrostu wydajności wentylacji grawitacyjnej w okresach niekorzystnych warunków klimatu zewnętrznego.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Etheridge D., Sandberg M., Building Ventilation: Theory and Measurement. John Wiley and Sons, 1996, ID: 94645862
- [2] Mochida A., Yoshino H., Takeda T., Kakegawa T., Miyauchi S., Methods for controlling airflow in and around a building under cross ventilation to improve indoor thermal comfort. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93, 2005, str. 437–449
- [3] Santamouris M., Wouters P., Building Ventilation: The state of the art. Earthscan, 2006, ISBN: 9781849770620
- [4] Etheridge D., Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design, John Wiley&Sons, 2011, ISBN: 9780470660355
- [5] Wcisło K., Fotowoltaika w Polsce i Europie, Energia dla przemysłu 2/2011
- [6] Lunde P. J., Solar Thermal Engineering. Space Heating and Hot Water Systems, John Wiley&Sons, 1980, ID:5819885
- [7] Duffie J., Beckman W., Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, 2013, doi:10.1002/9781118671603
- [8] Muneer T., Solar Radiation and Daylight Models, 2nd edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, str. 35–59
- [9] Wojewódka D., Analiza Skuteczności Konwersji Promieniowania Słonecznego w Przegrodach Zewnętrznych Budynku w Warunkach Klimatu Lokalnego, Politechnika Śląska w Gliwicach, praca doktorska, 2012
- [10] Hollands L., A derivation of the diffuse fraction's dependence on the clearness index. Solar Energy 35, 1985, str. 131–136
- [11] Erbs D., Klein S., Duffie J., Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation, Solar Energy 28, 1982, str. 293–302
- [12] De Miguel A., Bilbao J., Aguiar R., Kambezidis H., Negro E., Diffuse solar irradiation model evaluation in the north Mediterranean belt area, Solar Energy 70, 2001, str. 143–153
- [13] Orgill J., Hollands K., Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface, Solar Energy 19, 1977, str. 357–359
- [14] Włodarczyk D., Analiza wpływu fotowoltaicznych nadwiesz zacięających na bilans energetyczny budynku, praca doktorska, Politechnika Wroclawska, 2008
- [15] Chwieduk D., Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku, Warszawa: Prace IPPT PAN, 2006, str. 5–262
- [16] Blazek J., Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier Science Ltd., Kidlington, 2001, str. 213–252
- [17] Tesch K., Mechanika Płynów, Wydawnictwo Politechniki Gdanskie, 2008, str. 1–216
- [18] Workbench, ANSYS. 2009. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Canonsburg, USA, ANSYS Inc, 2009, str. 1–270

Serdecznie zapraszamy autorów do publikowania  
w „Przeglądzie Budowlanym”

Za publikację w naszym miesięczniku uzyskuje się **40** punktów

# Symulacja CFD oddziaływania wiatru na otwartą konstrukcję parkingu wielopoziomowego

CFD simulation of wind Effects on the open structure of a multi-storey car park

mgr inż. Kacper Marciniak (ORCID: 0009-0007-4200-1940), dr hab. inż. Michał Gołdyn (ORCID: 0000-0002-7791-1940) – promotor, Katedra Budownictwa Betonowego, Politechnika Łódzka

DOI: 10.5604/01.3001.0055.7455

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono przykład analizy obciążenia wiatrem konstrukcji otwartego parkingu wielopoziomowego z wykorzystaniem symulacji CFD. Przedstawiono najważniejsze założenia oraz przeanalizowano wpływ przeszkód w postaci pojazdów na charakter i wartość obciążenia generowanego na elementy konstrukcyjne. Podsumowano uzyskane wyniki symulacji, wskazując wady i zalety symulacji CFD w ujęciu zastosowania praktycznego.

**Słowa kluczowe:** symulacja CFD, tunel aerodynamiczny, obciążenie wiatrem, parking wielopoziomowy, konstrukcja szkieletowa.

**Abstract:** The paper presents a case study of wind load analysis on the structural system of an open multi-storey car park using CFD simulation. The fundamental assumptions adopted in the study are outlined, and the effect of obstacles, represented by vehicles, on both the character and magnitude of loads acting on structural members is examined. The outcomes of the simulations are synthesized, with particular emphasis on the advantages and limitations of CFD methods in terms of their practical applicability.

**Keywords:** CFD simulation, wind tunnel, wind load, multi-storey car park, frame structure.

## 1. Wprowadzenie

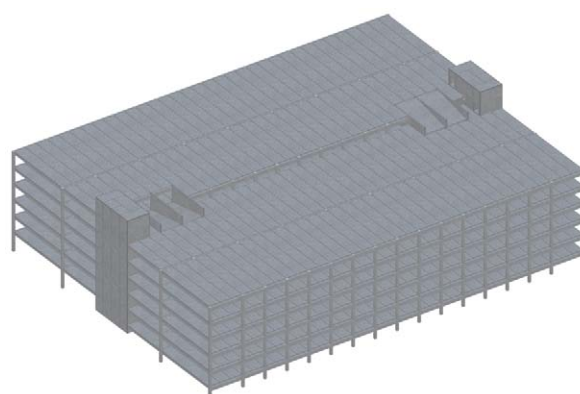
Współczesne konstrukcje inżynierskie charakteryzują się niejednokrotnie znaczną złożonością strukturalną, podyktowaną wymogami architektonicznymi i funkcjonalnymi. Jednym z przykładów są otwarte wielopoziomowe parkingi przeznaczone na postój samochodów osobowych. Tego typu obiekty charakteryzują się brakiem ścian zewnętrznych, co umożliwia przepływ powietrza i wentylację parkingu. Strugi powietrza napotykają przeszkody w postaci elementów konstrukcyjnych i pojazdów, co wywołuje obciążenie działające na konstrukcję budynku. Obowiązujące normy projektowe, w tym [1], nie zawierają wyczerpujących zasad, określających zasady ustalania wartości obciążenia wiatrem działającego na tego rodzaju układy konstrukcyjne. Najlepszą metodą wyznaczenia wpływu wiatru na konstrukcję są badania eksperymentalne na modelach w tunelu aerodynamicznym. Tego rodzaju badania, dość kosztowne i czasochłonne, realizowane są zazwyczaj w przypadku bardzo odpowiedzialnych konstrukcji, takich jak budynki wysokie lub mosty. Dzięki rozwojowi metod numerycznych możliwe stało się określanie oddziaływania wiatru za pomocą mechaniki płynów – symulacji przepływu cieczy i gazów CFD (Computational Fluid Dynamics). Rozwiązanie równań Naviera-Stokesa, opisujących ruch płynów, umożliwia wyznaczenie sił od wiatru na powierzchniach analizowanego modelu. Ogromną zaletą metody jest jej uniwersalność i możliwość określenia przepływu powietrza wokół konstrukcji o dowolnym

kształcie, z uwzględnieniem ich otoczenia, m.in. rzeźby tereny czy budowli sąsiadujących. Obecnie na rynku dostępnych jest kilka programów wykorzystujących technikę CFD. W artykule przedstawiono wyniki analizy przeprowadzonej w programie RWIND 2.0 firmy Dlubal.

## 2. Założenia analizy CFD

### 2.1. Opis analizowanego parkingu

Analizę CFD wykonano na przykładzie otwartego parkingu wielopoziomowego o wymiarach w rzucie 85,50x64,50 m, wykonanego w technologii żelbetowej prefabrykowanej. Budynek składa się z 6 kondygnacji nadziemnych, każda o wysokości 3,5 m.



**Rys. 1.** Model konstrukcji parkingu wielopoziomowego

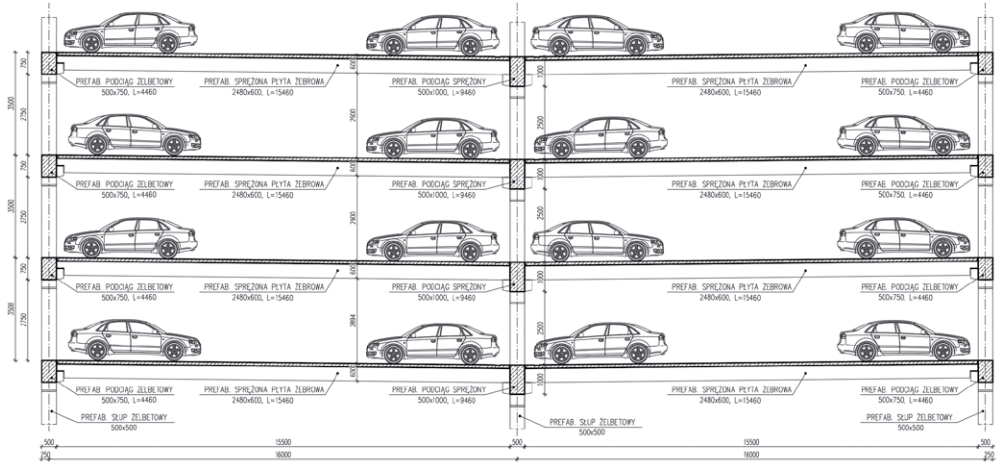
**Rys. 2.** Przekrój poprzeczny powtarzalnego układu konstrukcji stropów parkingu wielopoziomowego

Dodatkowo, w celu ograniczenia liczby ramp wjazdowo-zjazdowych, segmenty budynku są przesunięte względem siebie o 1/2 wysokości kondygnacji. Zaprojektowano 1300 miejsc postojowych dla samochodów osobowych. Najwyższy poziom parkowania znajduje się na wysokości 21,16 m n.p.t. Główną konstrukcję nośną budynku stanowią prefabrykowane ramy złożone ze słupów i strunobetonowych dźwigarów, na których, za pośrednictwem krótkich wsporników, opierają się sprężone płyty żebrowe. Widok konstrukcji parkingu przedstawiono na rysunku 1, a przekrój poprzeczny na rysunku 2.

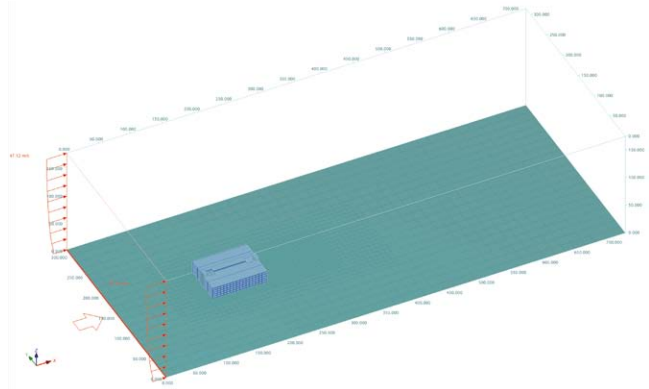
**2.2. Model obliczeniowy**

Model obliczeniowy powinien możliwie wiernie opisywać konstrukcję, uwzględniając położenie, sposób oparcia i gabaryty elementów nośnych. W rozważanym przypadku szczególną uwagę zwrócono na odwzorowanie żeber płyt stropowych oraz mimośrodowego oparcia płyt na podciągu, co zwiększa powierzchnię elementów, na którą efektywnie oddziałuje wiatr, co przedstawiono na rysunku 3. Kluczowym zagadnieniem jest określenie wymiarów cyfrowego tunelu aerodynamicznego, definiującego przestrzeń, w której będą prowadzone obliczenia. Niedoścignienie wymiarów obszaru wokół analizowanej konstrukcji wpływa bezpośrednio na generowane obciążenie wiatrem na powierzchniach oraz na stabilność i zbieżność obliczeń. W tym celu posłużono się zaleceniami autorów programu oraz informacjami zamieszczonymi w publikacji [2]. Symulację przepływu powietrza przeprowadzono w dwóch najważniejszych kierunkach: równoległym i prostopadłym do dłuższej krawędzi budynku. Przestrzeń obliczeniową – tunel aerodynamiczny wraz z modelem konstrukcji parkingu pokazano na rysunkach 4 i 5. Wymiary całkowite utworzonego tunelu aerodynamicznego wynosiły 720x315x175 m oraz 705x355x175 m, odpowiednio w przypadku wiatru działającego wzdłuż i prostopadle do budynku. Różnice w rozmiarach tunelu

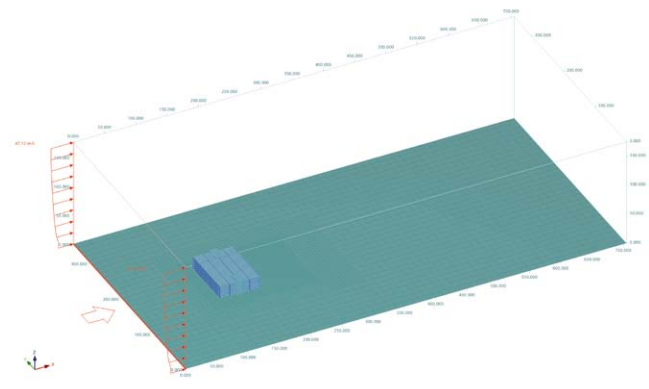
**Rys. 3.** Detal modelu obliczeniowego konstrukcji



aerodynamicznego są podyktowane minimalną wymaganą odległością od granicy modelu do skraju przestrzeni obliczeniowej według [2], dzięki czemu nie dochodzi do zaburzenia przepływu powietrza w obrębie stref brzegowych tunelu. Istotnym aspektem analizy oddziaływania wiatru na parking wielopoziomowy jest określenie wpływu na przepływ powietrza występowania i lokalizacji samochodów osobowych. W tym celu zdecydowano się dodatkowo przeanalizować różne warianty ustawienia pojazdów, których rozmieszczenie jest komplementarne z obszarami działania obciążenia użytkowego, zadanego w analizie statycznej parkingu. Analizowane modele



**Rys. 4.** Model tunelu aerodynamicznego – wiatr działający wzdłuż budynku



**Rys. 5.** Model tunelu aerodynamicznego – wiatr działający prostopadle do budynku

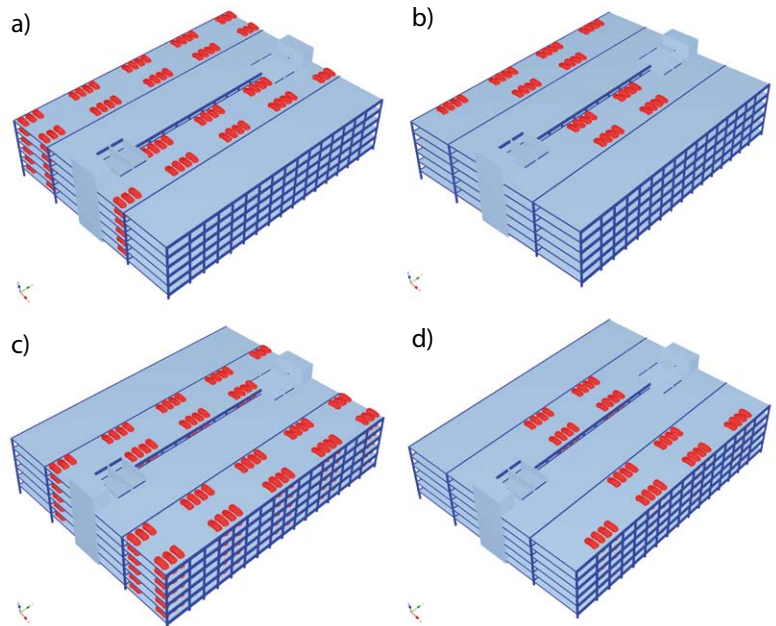
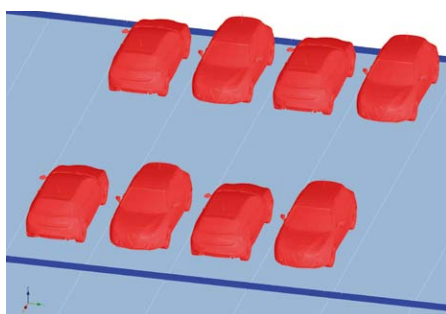
**Rys. 6.** Modele obliczeniowe rozważanych wariantów rozmieszczenia samochodów osobowych

obliczeniowe parkingu wielopoziomowego z czterema wariantami rozmieszczenia (układu) pojazdów przedstawiono na rysunku 6. Przyjęto rzeczywisty kształt samochodu osobowego, aby odwzorować realne warunki przepływu powietrza względem karoserii (rys. 7).

### 2.3. Parametry analizy

Istotne przy symulacji obciążenia wiatrem konstrukcji jest przyjęcie rozkładu prędkości wiatru na wlocie do tunelu aerodynamicznego oraz intensywności turbulencji. Rozkład prędkości został wyznaczony na podstawie założeń normy [1] i polskiego załącznika krajowego. Przyjęto, że parking znajduje się w 2. strefie obciążenia wiatrem, natomiast otaczający teren zakwalifikowano do IV kategorii (tereny miejskie). Przyjęty rozkład prędkości wiatru odpowiada profilowi według Davenporta [3], co pokazano na rysunku 8. Założenie intensywności turbulencji, która powiązana jest wysokością nad poziomem teren, rzędu około 40% (zgodnie z zapisami normy [1]) prowadzi do problemów z uzyskaniem zbieżności wyników obliczeń. Z tego względu autorzy prac [4, 5] sugerują przyjmowanie mniejszej wartości tego parametru, na poziomie 15%, co prowadzi do uzyskania mniej turbulentnego przepływu powietrza. Dodatkowo analiza CFD umożliwia uwzględnienie chropowatości powierzchni w zależności od właściwości materiału, co przyczynia się do zmiany pola przepływu powietrza wokół elementów i ciśnienia na powierzchniach. Parametr chropowatości określono zgodnie z zaleceniami normy [1], gdzie dla elementów betonowych zaleca się  $k = 0,2$  mm. W symulacji wiatru założono stacjonarny przepływ powietrza oraz przyjęto model turbulencji  $k-\epsilon$ , który jest standardowo stosowany w obliczeniach CFD dla mało skomplikowanych modeli złożonych głównie z prostopadłościanów. Jego główną zaletą jest stosunkowo niewielkie zapotrzebowanie na moc obliczeniową, przy uzyskaniu zbieżności obliczeń w stosunkowo krótkim czasie. Model turbulencji  $k-\epsilon$  należy do grupy modeli RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) i opisuje składowe tensora naprężeń turbulentnych Reynoldsa według hipotezy Boussinesqa, zgodnie z którą są one proporcjonalne do prędkości deformacji i wyrażone

**Rys. 7.** Modele samochodów osobowych zintegrowane z modelem obliczeniowym parkingu

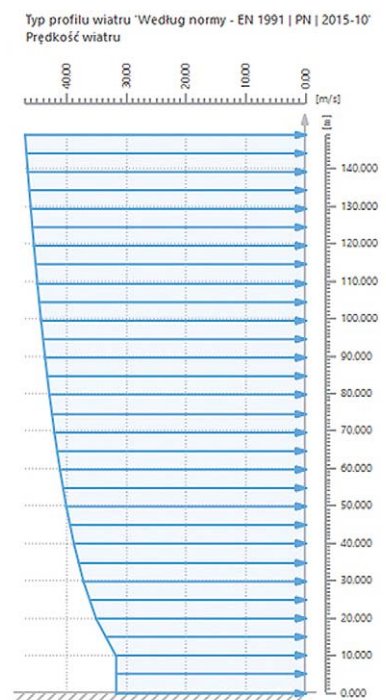


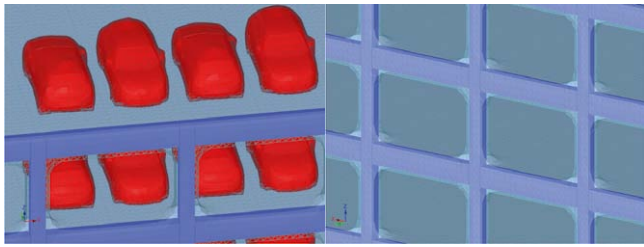
za pomocą współczynnika lepkości turbulentnej. Model ten pozwala uzupełnić niewiadome konieczne do rozwiązania równań ruchu Naviera-Stokesa, jednak uzyskanie zbliżonego do rzeczywistego opisu przepływu powietrza wymaga dopasowania energii kinetycznej turbulencji i jej dyssypacji [6].

### 2.4. Siatkowanie

Symulacja CFD bazuje na metodzie elementów skończonych, stąd kluczowe jest określenie parametrów i wielkości siatki. W tego typu analizie występują dwa rodzaje elementów skończonych: objętościowe – tworzące przestrzeń obliczeniową tunelu aerodynamicznego dla pola przepływu wiatru oraz powierzchniowe, mające odzwierciedlać powierzchnie zewnętrzne elementów konstrukcji. Po utworzeniu numerycznego modelu powłokowego konstrukcji program w obszarze tunelu aerodynamicznego generuje bryłową siatkę elementów skończonych z uwzględnieniem stref zagęszczenia (rys. 9). W przedstawionej analizie przyjęto minimalny rozmiar siatki elementów powierzchniowych, równy 24 cm. Konsekwencją wyboru

**Rys. 8.** Rozkład prędkości wiatru w funkcji wysokości tunelu aerodynamicznego



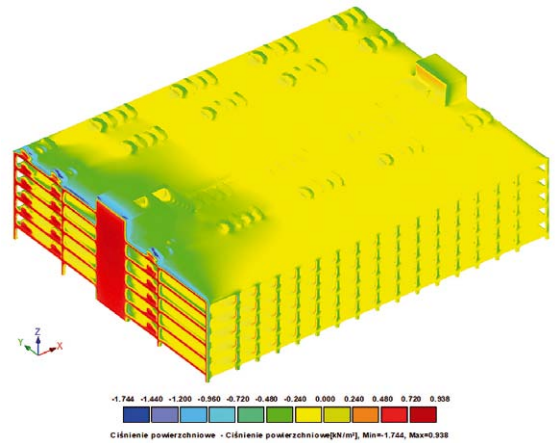


**Rys. 9.** Szczegół siatki MES odwzorowującej kształt elementów konstrukcji i pojazdów

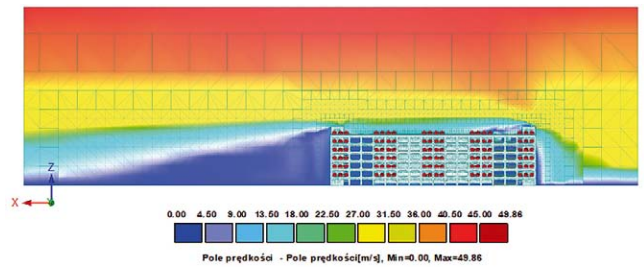
siatki jest stopień aproksymacji kształtu elementów konstrukcyjnych i obiektów. Ograniczenie rozmiaru siatki skutkuje pewnym zafałszowaniem rzeczywistości – na styku elementów konstrukcyjnych pojawiają się bowiem wyokrąglenia, powodujące zwiększenie powierzchni elewacji – rysunek 9. Zmniejszenie rozmiaru elementów skończonych pozwoliłoby na ograniczenie tej niedokładności, jednak przy jednoczesnym wydłużeniu czasu obliczeń. Ostatecznie każdy z 10 rozpatrywanych modeli symulacji działania wiatru na konstrukcję zawierał około 2,8 mln objętościowych elementów skończonych (komórek) i prawie 4 mln węzłów, co wiązało się czasem trwania obliczeń na poziomie około 7-8 godzin dla jednego modelu. Obliczenia prowadzono iteracyjnie, a zbieżność wyników uzyskiwano w 500–700-krokach.

### 3. Rezultaty obliczeń

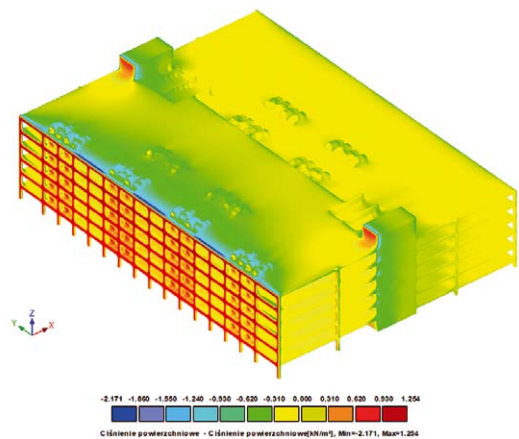
Wybrane wyniki obliczeń – mapy rozkładu ciśnienia na powierzchniach elementów konstrukcyjnych dla wybranych wariantów rozmieszczenia pojazdów w strefie parkowania przedstawiono na rysunkach 10–13. Ponadto w przeprowadzonej analizie uzyskano globalne współczynniki ciśnienia na powierzchni całej konstrukcji, co pozwoliło wyznaczyć obciążenie wiatrem w modelu służącym analizie statyczno-wytrzymałościowej. Program obliczeniowy umożliwił również określenie wartości współczynnika turbulencji, prędkości przepływu powietrza oraz współczynnika oporu aerodynamicznego. Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że zmiana wraz z wysokością obciążenia wiatrem słupów i belek występuje wyłącznie po stronie nawietrznej – różnica pomiędzy podstawą a wierzchołkiem budynku wynosi około 35%. Tak dużych różnic nie stwierdzono natomiast w przypadku elementów zlokalizowanych wewnątrz budynku. W tym przypadku obciążenie jest w przybliżeniu jednakowe na kolejnych kondygnacjach (różnica na poziomie 5%). Stwierdzono również, że obciążenie na powierzchni poszczególnych elementów konstrukcyjnych maleje wraz z oddalaniem się od elewacji nawietrznej, co związane jest z oporem aerodynamicznym wynikającym z występowania przeszkód pionowych i poziomych, a także sił tarcia na powierzchniach równoległych do kierunku przepływu powietrza. Przykładowo w odniesieniu do słupów drugiej kondygnacji obciążenie to zmienia się o 80% (kierunek wiatru równoległy do budynku) i 40% (kierunek wiatru prostopadły do budynku), porównując elewację nawietrzną i zawietrzną.



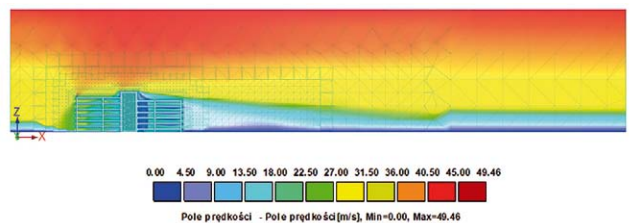
**Rys. 10.** Ciśnienie na powierzchniach modelu – 1. przypadek ustawienia pojazdów, wiatr działający równoległe do budynku – widok na stronę nawietrzną



**Rys. 11.** Pole prędkości wiatru – przekrój poprzeczny w obrębie klatki schodowej – 1. przypadek ustawienia pojazdów, wiatr działający równoległe do budynku

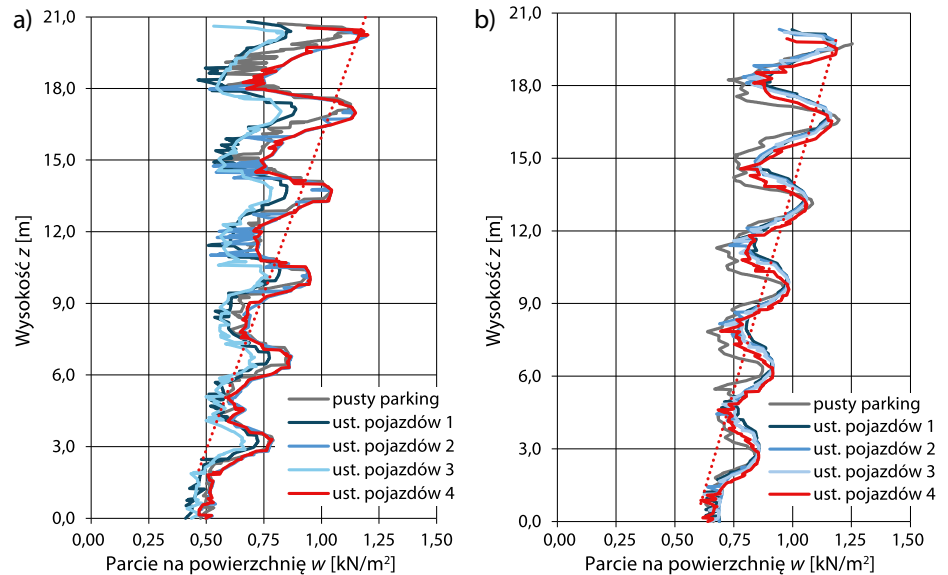


**Rys. 12.** Ciśnienie na powierzchniach modelu – 2. przypadek ustawienia pojazdów, wiatr działający prostopadłe do budynku



**Rys. 13.** Pole prędkości wiatru – przekrój poprzeczny w obrębie klatki schodowej – 2. przypadek ustawienia pojazdów, wiatr działający prostopadłe do budynku

**Rys. 14.** Parcie na powierzchni słupów skrajnych od strony nawietrznej: a) wiatr działający wzdłuż budynku, b) wiatr działający prostopadłe do budynku



Co istotne, możliwe było zaobserwowanie różnic w przepływie powietrza pomiędzy strefami parkowania i komunikacji. Elementy znajdujące się w śladzie aerodynamicznym, tj. zlokalizowane za klatką schodową i rampami są znacząco mniej obciążone niż słupy i belki otwartych na przepływ wiatru stref parkingu. W obrębie strefy parkingowej prędkość przepływu powietrza spada o około 40% (pomiędzy elewacją nawietrzną i zawietrzną), podczas gdy w strefie klatek schodowych zmiana ta dochodzi do 70%. Stwierdzono, że obciążenie na powierzchniach stropu (dolnej i górnej) jest jednakowe co do wartości jednak przeciwnych znaków. Samorównoważący się charakter obciążenia świadczy o swobodnym opływaniu powierzchni poziomych przez powietrze. Podrywanie płyty (wypadkowe ssanie) zaobserwowano jedynie w strefach przykrawędziowych i w sąsiedztwie przeszkód – pojazdów. Na potrzeby określenia wpływu ustawienia pojazdów oraz kierunku działania wiatru na obciążenie konstrukcji wykonano wykresy ilustrujące parcie na powierzchni słupów skrajnych od strony nawietrznej, w funkcji wysokości nad poziomem terenu (rys. 14). W celu porównania rezultatów obliczeń każdej z zależności przypisano liniową funkcję aproksymującą wartość obciążenia wiatrem (linia przerywana ilustruje dominującą funkcję aproksymującą).

Porównując uzyskane wykresy, można stwierdzić, że w przypadku działania wiatru wzdłuż budynku oraz prostopadłe do niego największe obciążenie poziome elementów zlokalizowanych w elewacji uzyskano w przypadku 4 wariantu ustawienia pojazdów (patrz rys. 4d). Do dalszej analizy wybrano ten właśnie przypadek, przy którym uzyskuje się największe obciążenia poziome. Obciążenia wybranych elementów konstrukcyjnych zestawiono w tabelach 1 i 2. Porównując bezwzględne wartości obciążenia słupów parkingu przy obu kierunkach działania wiatru, można zauważyć znacznie większe obciążenie słupów strony nawietrznej dla kierunku równoległego. Uzyskane różnice sięgały około 35–45%, co bezpośrednio wynika z różnicy w wymiarach budynku i geometrii układu konstrukcyjnego obu ścian elewacyjnych. Rozstaw słupów wzdłuż dłuższego boku budynku wynosi 5 m, podczas gdy w przypadku drugiej elewacji jest to 16 m. Tak dużych różnic nie obserwowano w przypadku słupów wewnętrznych zlokalizowanych w głębi strefy postojowej, gdzie większą wartość obciążenia uzyskano dla prostopadłego kierunku działania wiatru.

**Tabela 1.** Obciążenie wiatrem słupów i belek skrajnych (w elewacji nawietrznej)

| Wysokość<br>z | Wiatr działający wzdłuż budynku |                               |                             | Wiatr działający prostopadłe do budynku |                               |                             |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------|
|               | Strona<br>nawietrzna            | Strona<br>zawietrzna          | Obciążenie<br>wypadkowe     | Strona<br>nawietrzna                    | Strona<br>zawietrzna          | Obciążenie<br>wypadkowe     |
| [m]           | $w_N$<br>[kN/m <sup>2</sup> ]   | $w_Z$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $w$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $w_N$<br>[kN/m <sup>2</sup> ]           | $w_Z$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $w$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |
| 0             | 0,67                            | -0,35                         | 1,02                        | 0,76                                    | 0,20                          | 0,56                        |
| 1,75          | 0,70                            | -0,35                         | 1,05                        |   | -                             |                             |
| 3,5           | 0,73                            | -0,35                         | 1,08                        | 0,83                                    | 0,20                          | 0,63                        |
| 5,25          | 0,76                            | -0,41                         | 1,17                        |   | -                             |                             |
| 7             | 0,79                            | -0,41                         | 1,20                        | 0,91                                    | 0,14                          | 0,77                        |
| 8,75          | 0,82                            | -0,45                         | 1,27                        |   | -                             |                             |
| 10,5          | 0,85                            | -0,45                         | 1,30                        | 0,98                                    | 0,11                          | 0,88                        |
| 12,25         | 0,88                            | -0,47                         | 1,35                        |   | -                             |                             |
| 14            | 0,91                            | -0,47                         | 1,38                        | 1,06                                    | 0,15                          | 0,91                        |
| 15,75         | 0,94                            | -0,5                          | 1,44                        |   | -                             |                             |
| 17,5          | 0,97                            | -0,5                          | 1,47                        | 1,14                                    | 0,185                         | 0,95                        |
| 19,25         | 1,00                            | -0,55                         | 1,55                        |   | -                             |                             |
| 21            | 1,03                            | -0,55                         | 1,58                        | 1,21                                    | 0,17                          | 1,05                        |

Łączne siły oporu przepływu powietrza przez analizowaną konstrukcję przedstawiono w tabeli 3. Można zaobserwować, że występowanie dodatkowych przeszkód w postaci samochodów rozmieszczonych w strefach postojowych zwiększyło efekty oddziaływania wiatru na konstrukcję. W zależności od kierunku działania wiatru uzyskano różnicę na poziomie 4 do 9%. Sumy sił na powierzchni siatki elementów obliczeniowych są znacząco większe w przypadku wiatru działającego prostopadłe do budynku, co wynika z większej powierzchni elewacji, na którą działa przepływające powietrze.

**Tabela 2.** Obciążenie wiatrem słupów wewnętrznych

| Lp.* | Wiatr działający wzdłuż budynku |                      |                      | Wiatr działający prostopadłe do budynku |                      |                      |
|------|---------------------------------|----------------------|----------------------|---|----------------------|----------------------|
|      | Wiatr – nawierzchna             | Wiatr – zawierzchna  | Wiatr – suma         | Wiatr – nawierzchna                     | Wiatr – zawierzchna  | Wiatr – suma         |
|      | $w_N$                           | $w_Z$                | $w$                  | $w_N$                                   | $w_Z$                | $w$                  |
| [-]  | [kN/m <sup>2</sup> ]            | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ]                    | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] |
| 2    | 0,296                           | -0,426               | 0,72                 | 0,576                                   | -0,386               | 0,96                 |
| 3    | 0,077                           | -0,275               | 0,35                 | 0,58                                    | -0,17                | 0,75                 |
| 4    | 0,015                           | -0,19                | 0,21                 | 0,644                                   | -0,02                | 0,66                 |
| 5    | 0,01                            | -0,123               | 0,13                 | 0,62                                    | 0,05                 | 0,57                 |
| 6    | -0,018                          | -0,09                | 0,07                 | -                                       |                      |                      |
| 7    | -0,035                          | -0,089               | 0,05                 |   |                      |                      |
| 8    | -0,054                          | -0,162               | 0,11                 |   |                      |                      |
| 9    | -0,077                          | -0,224               | 0,15                 |   |                      |                      |
| 10   | -0,056                          | -0,27                | 0,21                 |   |                      |                      |

\* numeracja kolejnych słupów wewnętrznych danej kondygnacji, liczona od strony nawierzchni

**Tabela 3.** Globalna suma sił oporu przepływu powietrza w tunelu aerodynamicznym

| Kierunek wiatru        | Pusty parking [kN] | 1 ustawienie pojazdów [kN] | 2 ustawienie pojazdów [kN] | 3 ustawienie pojazdów [kN] | 4 ustawienie pojazdów [kN] |
|------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Równoległy do budynku  | 909,45             | 941,03                     | 996,57                     | 936,26                     | 998,54                     |
| Prostopadły do budynku | 1475,38            | 1519,73                    | 1477,40                    | 1526,43                    | 1482,40                    |

Symulacja przepływu wiatru umożliwiła określenie współczynnika oporu aerodynamicznego, którego maksymalna wartość w przypadku słupów wyniosła 1,35. Była ona mniejsza od współczynnika obliczonego na podstawie zapisów normy [1], który wynosi 1,91. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że przez niedoskonałość kształtowania siatki elementów skończonych wokół słupa nie została odzwierciedlona jego rzeczywista geometria (przekrój z zaokrąglonymi narożnikami), co ma wpływ na wyniki obliczeń współczynnika.

#### 4. Podsumowanie

Symulacja CFD stwarza ogromne możliwości szczegółowej analizy przepływu powietrza w przypadku konstrukcji nietypowych, nieuwjętych wprost w normowej procedurze określania obciążenia wiatrem. Umożliwia szczegółową prezentację wielu ważnych rezultatów, takich jak m.in. rozkład ciśnienia na powierzchniach modelu, pole prędkości przepływu powietrza jak również określenie współczynnika oporu aerodynamicznego i innych wielkości związanych z turbulentnym przepływem gazów, takich jak energia kinetyczna i szybkość dyssypacji turbulencji. Co szczególnie ważne, w przypadku budynków takich jak parkingi wielopoziomowe, symulacja CFD umożliwiła przeanalizowanie wpływu umiejscowienia pojazdów, na efekty działania wiatru

– zarówno o charakterze lokalnym, jak i globalnym. W rozważanym przypadku stwierdzono, że występowanie przeszkód w postaci pojazdów prowadziło do wzrostu całkowitego obciążenia poziomego względem pustego parkingu od 4 do 9%. Przepływ powietrza w strefie parkowania pojazdów miał charakter laminarny, czego nie można było powiedzieć o obszarach w sąsiedztwie klatek schodowych i ramp. Stwierdzono zmianę prędkości powietrza o 70% pomiędzy strefą w obrębie nawierzchni i zawierzchni elewacji budynku. W strefie postojowej różnica ta nie przekraczała 40%, co świadczy o znacznie mniejszym zaburzeniu przepływu powietrza przez

parkujące samochody, między innymi z uwagi na występowanie wolnej przestrzeni o wysokości około 1,5 m pomiędzy dachami pojazdów a dolną powierzchnią żeber płyt stropowych. Obciążenia słupów zewnętrznych i wewnętrznych znacząco się od siebie różnią (nawet do 80%), co byłoby trudne do uwzględnienia w przypadku stosowania ogólnego, uproszczonego podejścia normowego [1].

Wyniki przeprowadzonej symulacji przepływu powietrza w obu kierunkach jasno wskazują, że występowanie pojazdów oraz ich umiejscowienie wpływają na wartości generowanego ciśnienia na powierzchniach elementów. Pominięcie pojazdów może powodować tym samym niedoszacowanie obciążenia wiatrem konstrukcji.

Podsumowując, należy stwierdzić, że określenie oddziaływania wiatru na skomplikowane obiekty takie jak parkingi otwarte jest trudnym zadaniem projektowym. Wydaje się, że symulacja CFD jest współcześnie najlepszym sposobem ustalania wpływu wiatru na tego rodzaju konstrukcje. Przedstawiony przykład miał na celu ukazanie możliwości, jakie oferuje zaawansowana analiza numeryczna, pozwalająca projektantowi prześledzić wpływ przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych na właściwości aerodynamiczne konstrukcji, bez konieczności wykonywania skomplikowanych i kosztownych badań w tunelu aerodynamicznym.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1991-1-4: 2008 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – część 1–4: Oddziaływania ogólne – oddziaływania wiatru,
- [2] Blocken B., Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations, *Building and Environment* 91, 2015, str. 219–245
- [3] Isyumov N., Alan G., Davenport’s mark on wind engineering, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104–106, 2012, str. 12–24
- [4] Moravej M., Estephan J., Irwin P., Chowdhury A., Scaling effects on peak wind load estimation for low-rise buildings: An experimental and analytical study, *Engineering Structures* 316, 2024, art. 118499
- [5] Mengistu M., Repetto M., Analytical downburst wind load calculation methods: Review and full-scale validation, *Engineering Structures* 324, 2024
- [6] Jamińska P., Wpływ sposobu zdefiniowania struktury wiatru w modelu turbulencji k-ε w wersji standard na rozkład współczynnika ciśnienia na powierzchni ścian prostopadłościannu, *Budownictwo i Architektura* 10/2012, str. 93–104

## Prof. dr hab. inż. Piotr Konderla (1943–2025)



18 czerwca 2025 roku niespodziewanie odszedł prof. dr hab. inż. Piotr Konderla – wybitny uczony, nauczyciel akademicki i człowiek, który całym swoim życiem służył nauce i Politechnice Wrocławskiej. Odszedł w pełni sił intelektualnych i fizycznych, pozostawiając po sobie ogromny dorobek, liczne grono uczniów i współpracowników oraz pamięć o Profesorze, który łączył w sobie rzadką cechę – naukową przenikliwość i ludzką dobroć.

Był człowiekiem niezwykle pracowitym, spokojnym i skromnym, a przy tym o imponującej erudycji. Jego śmierć pozostawiła pustkę w środowisku naukowym budownictwa i mechaniki konstrukcji, zwłaszcza w zespole wytrzymałości materiałów Katedry Mechaniki Budowli i Inżynierii Miejskiej Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, z którym przez kilkadziesiąt lat był związany zawodowo.

**Droga naukowa i zawodowa.** Profesor Piotr Konderla urodził się 3 stycznia 1943 roku w Skoczowie. Zdał maturę w 1963 w Technikum Budowlanym w Cieszynie, równolegle uczęszczał do Państwowej Szkoły Muzycznej. Następnie przez rok pracował w Zakładzie Prefabrykacji Betonów w Skoczowie na stanowisku kierownika Laboratorium Zakładowego, a później mistrza produkcji. Od roku 1964 całą swoją drogę zawodową związał z Politechniką Wrocławską, gdzie ukończył studia, uzyskał wszystkie stopnie naukowe i przez dziesięciolecia kształcił inżynierów budownictwa.

Ukończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Budownictwa Lądowego Politechniki Wrocławskiej, gdzie w roku 1969 obronił pracę magisterską pt. „Wpływ odkształcalności osiowej na drgania ram”, napisaną pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Jana Langer. W 1973 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych na podstawie rozprawy pt. „Statyka powłoki o kształcie hiperboloidy jednopowłokowej przy uwzględnieniu nieliniowości geometrycznej” (promotor: prof. dr hab. inż. Otton Dąbrowski). Już ta praca pokazała jego talent – łączyła nowoczesne podejście matematyczne z praktycznym rozumieniem konstrukcji. Wyniki badań naukowych zostały opublikowane w szeregu prac naukowych, które na początku lat 70. ubiegłego wieku były jednymi z nielicznych polskich prac dotyczących nieliniowego modelowania powłok w ujęciu MES. W 1986 roku uzyskał tytuł doktora habilitowanego w naukach technicznych na podstawie rozprawy pt. „Mechanika ciała odkształcalnego o narastającej masie”, w której opracował modele ośrodków o zmiennej masie i geometrii – koncepcję wyprzedzającą ówczesne badania. W 2001 roku uzyskał zasłużoną nominację profesorską z rąk prezydenta Aleksandra Kwaśniewskiego.

W swojej pracy na macierzystej uczelni pełnił wiele funkcji, między innymi: w kadencji 2002–2005 prodziekana ds. naukowych Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego, zastępcy dyrektora Instytutu Inżynierii Lądowej ds. współpracy z przemysłem i kształcenia kadr (1990–1993 za kadencji prof. dr hab. inż. Pawła Śniadego oraz 1993–1995 za kadencji prof. dr hab. inż. Bogdana Stypułkowskiego).

W 1994 roku został kierownikiem Zakładu Wytrzymałości Materiałów Instytutu Inżynierii Lądowej na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego. Funkcję tę pełnił przez 20 lat – do 2014 roku, kiedy przeszedł na emeryturę. Był to okres dynamicznego rozwoju jednostki i czasu, w którym wychował całe pokolenie inżynierów, doktorów i nauczycieli akademickich.

**Dorobek naukowy i osiągnięcia.** Profesor Konderla zajmował się głównie mechaniką budowli, metodami numerycznymi, teorią powłok cienkich, konstrukcjami sprężonymi oraz modelowaniem ciał o złożonych właściwościach fizycznych. Jego dorobek można uznać za jeden z najbardziej wszechstronnych w polskiej szkole mechaniki konstrukcji. Na początku swojej działalności naukowej skoncentrował się na mechanice powłok cienkich. Opracował oryginalne algorytmy metody elementów skończonych (MES) dla analizy powłok w zakresie nieliniowości geometrycznej, wykorzystując subparametryczne elementy skończone. Przeprowadzał również badania w zakresie analizy dynamicznej powłok obrotowych przy okresowym wzbudzeniu. Analizował powłoki obrotowe jako ciała lepkosprężyste poddane periodycznemu wymuszeniu brzegu powłoki. Badał głównie wpływ częstotliwości wymuszenia na reakcję na brzegu powłoki.

Jego habilitacja z 1986 roku dotyczyła zagadnienia mechaniki ciała odkształcalnego, którego masa narasta w czasie – unikatowego problemu teoretycznego. Analizował proces narastania konstrukcji inżynierskich obciążanych w trakcie całego procesu. Przyjmował różne modele ciała: model sprężysty, lepkosprężyste ciało Volterra-Boltzmana oraz lepkosprężyste ciało starzejące się Arutuniana. Teorię Profesora wykorzystano do analizy procesu wznoszenia chłodni kominowych w Polsce. Ze względu na współpracę z przemysłem (między innymi Elektrownie Turów, PAK, Bełchatów czy Gdynia), częstym przedmiotem zainteresowań Profesora były jedno z najbardziej wymagających konstrukcji inżynierskich – chłodnie kominowe. Profesor badał między innymi wpływ nasłonecznienia powłoki, imperfekcji geometrycznych i błędów montażowych na stan naprężeń w konstrukcjach o kształcie hiperboloidalnym. Kierował kompleksowymi badaniami w tym zakresie obejmującymi pomiary terenowe, badania materiałowe i analizy numeryczne. Jego prace były wykorzystywane w praktyce inżynierskiej, a wnioski – cytowane przez projektantów i ośrodki badawcze.

Narzędziem służącym do analizy badanych konstrukcji inżynierskich były metody numeryczne. Profesor wykorzystywał główne metody numeryczne: MRS (Metoda Różnic Skończonych), MES (Metoda Elementów Skończonych) i MEB (Metoda

Elementów Brzegowych). W związku z tym zajmował się zagadnieniem nieskończone wymiarowych elementów w modelu MEB – badał wpływ modelu dyskretnego MEB na rozwiązanie zagadnienia nieskończonej sprężystej warstwy jednorodnej i niejednorodnej obciążonej stemplem, porównując wyniki z istniejącymi rozwiązaniami analitycznymi i numerycznymi MES. Profesor Konderla udowodnił twierdzenie dotyczące najlepszego w sensie energetycznym doboru modelu MES („najlepszą aproksymację MES uzyskuje się, kiedy stosunek energii sprężystej do gęstości węzłów modelu dyskretnego MES jest stały w całym obszarze”). Było to osiągnięcie o charakterze teoretycznym, które znalazło zastosowanie w tworzeniu adaptacyjnych siatek MES i zostało zauważone w środowisku międzynarodowym.

Profesor opracował oryginalne modele MES służące do analizy konstrukcji sprężonych cięgnami – od jedno- po trójwymiarowe. Modele te dokładnie odwzorowywały proces sprężania oraz współpracę między cięgnem a otaczającą matrycą betonową. Uwzględnił tarcie typu Coulomba, analizując jego wpływ na stateczność i nośność konstrukcji. Były to prace, które znacząco poszerzyły wiedzę o konstrukcjach strunobetonowych i kablobetonowych.

Kolejnym ważnym nurtem Jego działalności były zagadnienia kontaktowe ciał sprężystych i lepkosprężystych. Opracował algorytmy metody elementów brzegowych (MEB) do analizy kontaktowej, które znalazły praktyczne zastosowanie m.in. przy projektowaniu uszczelnień wałów silników. Był współautorem programów do analizy i optymalizacji uszczelnień, które wykorzystywano w przemyśle maszynowym. Profesor był autorem i współautorem szeregu programów komputerowych do analizy konstrukcji. Programy te stanowiły przykład tego, jak łączyć naukę z praktyką inżynierską – coś, co Profesor zawsze uważał za obowiązek uczonego. Sformułował algorytm metody elementów skończonych i napisał autorski program na dostępny przed laty komputer Odra 1204, stosując oryginalne subparametryczne elementy skończone. Był autorem szeregu profesjonalnych programów komputerowych wspomagających projektowanie w budownictwie, takich jak PL-Win i FD-Win. W tym zakresie współpracował z szeregiem europejskich firm, dla których tworzył specjalistyczne oprogramowania. W późniejszych latach Profesor zainteresował się sztucznymi sieciami neuronowymi i ich wykorzystaniem w budownictwie. Koordynował prace nad systemami eksperckimi wspomagającymi optymalizację materiałów kompozytowych. Był jednym z pierwszych polskich naukowców w tej dziedzinie.

Profesor dużo współpracował z pracownikami Wydziałów Mechanicznego oraz Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej. Świadczy o tym między innymi zaangażowanie Profesora w działalność Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej oraz praca doktorska napisana pod Jego kierunkiem, której tematyka dotyczyła modelu pracy zastawki aortalnej w ujęciu mechaniki ośrodka ciągłego łącząca precyzję inżynierii z medycyną.

**Profesor jako nauczyciel i mentor.** Profesor Piotr Konderla miał niezwykle dar tłumaczenia złożonych zagadnień w prosty, przejrzysty sposób. Dla studentów był wymagający, ale zawsze sprawiedliwy i życzliwy. Początkowo sprawiał wrażenie osoby surowej i niedostępnej, ale z czasem każdy przekonywał się, że kryje się za tym niezwykle ciepły i serdeczny człowiek. Zawsze miał czas dla studentów i młodszych pracowników, potrafił wysłuchać, a następnie doradzić.

W 1997 roku ukazał się podręcznik akademicki: Piotr Konderla, Tomasz Kasprzak, pt. „Metody komputerowe w teorii sprężystości. Część 1. Metoda elementów skończonych” (Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 1997).

Był promotorem czterech rozpraw doktorskich (1991 r. dr inż. Haysam Hamideh „Analiza płaskich zagadnień teorii sprężystości przy użyciu metody elementów brzegowych; 1998 r. dr inż. Grzegorz Waśniewski „Niestacjonarne drgania zbiornika wypełnionego cieczą”; 2000 r. dr inż. Daniel Antoniak „Nieliniowe modelowanie konstrukcji sprężonych cięgnami”; 2014 r. dr inż. Krzysztof Patrański „Model pracy zastawki aortalnej w ujęciu mechaniki ośrodka ciągłego”).

Oprócz dydaktyki dla studentów Wydziału Budownictwa Lądowego Profesor prowadził szereg kursów dla pracowników Politechniki Wrocławskiej, których tematem były modele materiału i konstrukcji dźwigarów powierzchniowych oraz metoda elementów skończonych. Będąc już wiele lat na emeryturze, w 2022 roku Profesor Konderla poprowadził inspirujący wykład dla studentów Koła Naukowego Mechaniki przy Katedrze Mechaniki Budowli i Inżynierii Miejskiej pt. „Splątanie: problemy fizyczne teorii kwantów i teorii względności”.

**Współpraca międzynarodowa.** Profesor współpracował z wieloma ośrodkami naukowymi za granicą, między innymi: Université de Sherbrooke (Kanada, 1988–1990) – badania nad kompozytami; Dichtungstechnik G. Bruss & Co. KG (Niemcy, 1986–1995) – zagadnienia kontaktowe uszczelnień; MBT Zürich (Szwajcaria, 1996–1998) – badania nad kompozytami cementowymi.

**Działalność organizacyjna i środowiskowa.** Wielokrotnie był współorganizatorem lub sekretarzem naukowym konferencji naukowych, takich jak: Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB w Krynicy, Konferencja nt. Metod Komputerowych w Mechanice Konstrukcji, Sympozjony poświęcone reologii. Ponadto wielokrotnie był członkiem komitetów naukowych konferencji o zasięgu ogólnopolskim. Na podkreślenie zasługuje 55-letnie członkostwo i ogromne zaangażowanie Pana Profesora Piotra Konderli w działalność Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej (PTMTS). Profesor pełnił funkcję przewodniczącego Oddziału Wrocławskiego w latach 1988–2004, łącząc ją z funkcją członka Zarządu Głównego. Następnie do roku 2016 pełnił funkcję zastępcy przewodniczącego oddziału. W 2008 r. otrzymał Złotą Odznakę Zasłużony dla Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, a w 2015 r. uzyskał status



Autor szkicu:  
dr inż. Stanisław Krocza

Członka Honorowego PTMTS. Od 2017 do 2025 roku był bardzo aktywnym członkiem zarządu PTMTS O/Wrocław. Na podkreślenie zasługuje inicjacja i organizowanie od roku 2000 cyklicznych ogólnopolskich Sympozjonów Naukowych pt.: „Kompozyty, konstrukcje warstwowe”. Odbywały się one w różnych miejscach Dolnego Śląska, pierwszy w Szklarskiej Porębie; następnie w latach 2002, 2004 i 2006 w Karpaczu; 2009 r. w Karłowiu; 2012 r. w Srebrnej Górze. W 2014 roku odbył się VII Sympozjon, jubileuszowy w Pawłowicach z okazji 45-lecia pracy zawodowej Pana Profesora. Kolejne to: Różanka 2017 i Łężyce 2024. We wszystkich dziewięciu Sympozjonach Pan Profesor był przewodniczącym Komitetu Naukowego. Zwykle sympozjony ograniczały się do około 36 sumiennie recenzowanych prac, około 70 uczestników z krajowych ośrodków naukowych. Przez 20 lat Pan Profesor był współredaktorem wrocławskiego czasopisma naukowego Studia Geotechnica et Mechanica. Był także członkiem kolegium redakcyjnego czasopism naukowych Archives of Civil and Mechanical Engineering oraz Civil and Environmental Engineering Report.

Na szczególne podkreślenie zasługuje działalność prof. Piotra Konderli na rzecz krajowego środowiska akademickiego. Przez 2 kadencje (lata 2006–2014) pełnił funkcję członka Rady Głównej Nauki i Szkolnictwa Wyższego, był też przewodniczącym Komisji Rady

Głównej zajmującej się opiniowaniem wniosków dotyczących uprawnień akademickich jednostek naukowych. Był także wiceprzewodniczącym Sekcji Mechaniki Konstrukcji Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Był członkiem Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, członkiem Sekcji Biomechaniki Komitetu Mechaniki PAN i członkiem Sekcji Mechaniki Konstrukcji i Materiałów oraz członkiem Zespołu Ekspertów NCN.

**Odznaczenia i wyróżnienia.** Za działalność naukową, organizacyjną i badawczą na rzecz gospodarki Profesor Piotr Konderla był wielokrotnie nagradzany i odznaczany. Między innymi otrzymał Złoty Krzyż Zasługi, był sześciokrotnie wyróżniany nagrodami Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, otrzymał Medal Edukacji Narodowej, nagrodę Senatu Politechniki Wrocławskiej, a także nagrodę im. Stefana Bryły przyznaną przez Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa.

**Profesor – Człowiek.** Profesor Konderla był człowiekiem niezwyklej, wysokiej klasy. Łączył naukową surowość z ogromną wrażliwością i taktem. Człowiek honorowy, dbał o swoich następców. Profesor pięknie śpiewał, jego hobby była też informatyka, szachy i brydż, no i jak czasem podkreślał – sporty ekstremalne.

Pozostawił kochającą żonę dr inż. Halinę Konderłę – geotechnik, adiunkt – również związaną z Wydziałem Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej oraz ukochanego syna Michała wraz z rodziną, w tym dwójkę ukochanych wnuków. Zawsze podkreślał, jak wielkie znaczenie miała dla niego Rodzina – była jego oparciem i źródłem siły. Profesor dr hab. inż. Piotr Konderla pozostanie w naszej pamięci jako uczony o niezwykle szerokich horyzontach, ale także jako człowiek dobry, spokojny, zrównoważony i zawsze gotowy, by dzielić się wiedzą oraz pomocą. Dla swoich uczniów był kimś więcej niż nauczycielem – był wzorem do naśladowania, pokazywał, jak można żyć nauką, ale nie tracić w niej człowieczeństwa.

**dr hab. inż. Monika Podworna, prof. uczelni**  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska

**dr hab. inż. Wojciech Błazejewski, prof. uczelni**  
Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska

**Zdzisławowi Binerowskiemu**  
Członkowi Honorowemu PZITB  
wyraży głębokiego żalu i szczerego  
współczucia z powodu śmierci  
**Żony Wandy**  
składają koleżanki i koledzy  
z PZITB i redakcji „PB”

**Dr inż. Stefanowi Pyrakowi**  
Członkowi Honorowemu PZITB  
wyraży szczerego współczucia  
z powodu śmierci  
**Żony Karoliny Elżbiety**  
składają koleżanki i koledzy  
z PZITB i redakcji „PB”

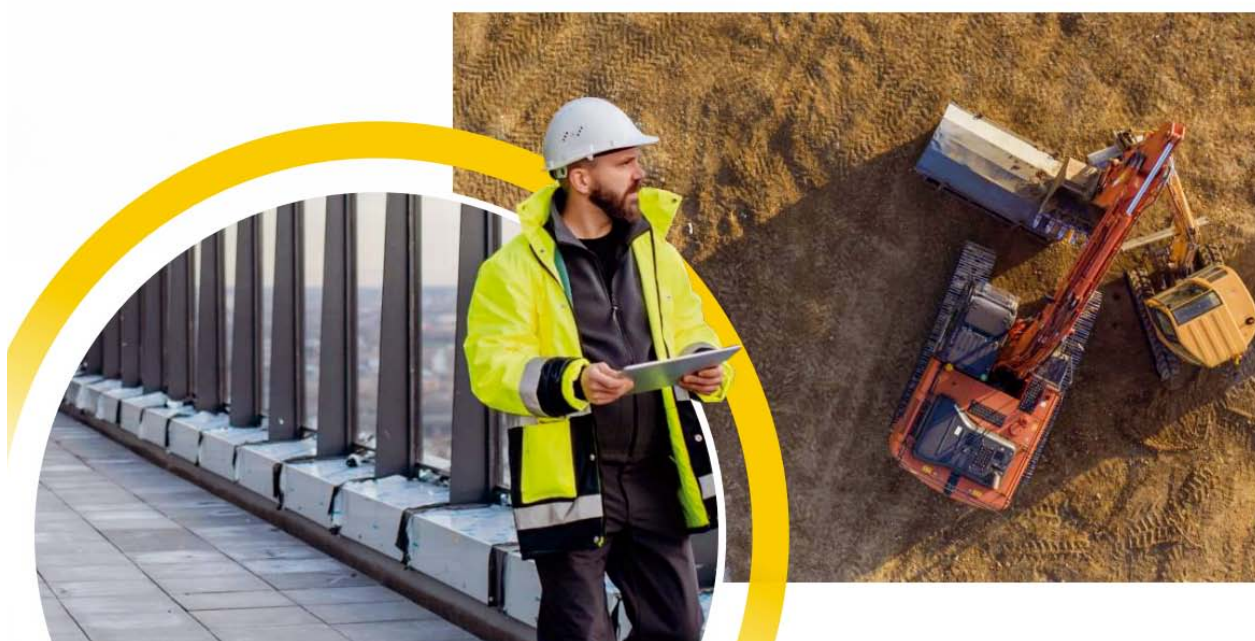
**budimex**

Dołącz do jednego z naszych kontraktów!

# ZMIENIAJ Z NAMI ŚWIAT



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



# 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](http://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.

