

JCEE

---

Czasopismo  
Inżynierii Lądowej,  
Środowiska  
i Architektury

---

Journal of Civil  
Engineering,  
Environment  
and Architecture

---

Kwartalnik  
tom XXXIV  
zeszyt 64 (nr 4/1/2017)  
październik-grudzień

(e-ISSN 2300-8903)

Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury jest kontynuacją  
Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej - Budownictwo i Inżynieria Środowiska.

Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny  
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej  
prof. dr hab. Grzegorz OSTASZ

Rada Naukowa

prof. Hasan Arman (Zjednoczone Emiraty Arabskie), prof. Zinoviy Blikharskyy (Ukraina)  
prof. Antonio João Carvalho de Albuquerque (Portugalia), prof. Marina Ciuna (Włochy)  
prof. Volodymyr V. Cherniuk (Ukraina), prof. Maurizio d'Amato (Włochy)  
prof. Endre Domokos (Węgry), prof. Mohamed Eid (Francja), prof. Maria Elektorowicz (Kanada),  
prof. Haritha Malladi (USA), prof. Samuel Hudson (USA), prof. Dušan Katunsky (Słowacja)  
prof. Krzysztof Knapik (Polska), prof. Ryszard L. Kowalczyk (Australia)  
prof. Jozef Kriš (Słowacja), prof. Vincent Kvočak (Słowacja), prof. Stanisław Kuś (Polska)  
prof. Mladen Radujkovic (Chorwacja), prof. Czesława Rosik-Dulewska (Polska)  
prof. Francesca Salvo (Włochy), prof. João Antonio Saraiva Pires da Fonseca (Portugalia)  
prof. Marco Simonotti (Włochy), prof. Nadežda Številová (Słowacja),  
prof. Janusz A. Tomaszek (Polska), prof. David Valis (Czechy)  
prof. António Avelino Batista Vieira (Portugalia), prof. Oksana Vovk (Ukraina)  
prof. Tomasz Winnicki (Polska), prof. Jerzy Ziółko (Polska)

Komitet Redakcyjny

(afiliacja: Polska)

*redaktor naczelny*

dr hab. inż. Piotr KOSZELNIK, prof. PRz

*redaktorzy tematyczni (naukowi)*

dr hab. inż. Bartosz MILLER, prof. dr hab. inż. Janusz RAK

*redaktor statystyczny*

dr hab. inż. Szczepan WOLIŃSKI, prof. PRz

*sekretarz redakcji*

dr inż. Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK

*członkowie*

dr inż. Renata GRUCA-ROKOSZ, dr inż. arch. Anna SIKORA, dr inż. Michał JUREK,  
dr hab. inż. Lucjan ŚLĘCZKA, prof. PRz, mgr inż. Artur SZALACHA

Przygotowanie matryc

Artur SZALACHA

p-ISSN 2300-5130

e-ISSN 2300-8903

Wersja drukowana Kwartalnika jest wersją pierwotną.

Redakcja czasopisma: Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska  
i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, [www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-  
-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/](http://www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-<br/>-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/) (e-mail: [jceea\\_bud@prz.edu.pl](mailto:jceea_bud@prz.edu.pl))

Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 12,  
35-959 Rzeszów, [www.oficyna.prz.edu.pl](http://www.oficyna.prz.edu.pl) (e-mail: [oficyna@prz.edu.pl](mailto:oficyna@prz.edu.pl))

Informacje dodatkowe i stopka – str. 449



## SPIS TREŚCI

Barbara TUROŃ, Dominika ZIAJA, Bartosz MILLER: Rejestracja i analiza pól przemieszczeń i odkształceń za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D.....	7
Bogusław SZUBA: Innowacyjne kształtowanie obiektów energooszczędnych na przykładzie przebudowy byłego obiektu wojskowego na centrum szkoleniowo konferencyjne w Prudniku .....	29
Anna MŁYŃSKA, Krzysztof CHMIELOWSKI, Dariusz MŁYŃSKI: Redukcja związków biogenych na wybranych oczyszczalniach ścieków województwa podkarpackiego z uwzględnieniem warunków pogody suchej i mokrej.....	39
Marek URBANIK, Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Selected Issues of Gas Supply Safety.....	51
Nadezda STEVULOVA, Ivana SCHWARZOVA: Influence of Alternative Binder on the Properties of Hemp Hurds Composites .....	59
Jarosław ZAWADZKI: Praktyczne zastosowanie nowoczesnych technologii podczas procesu rewitalizacji wielkopłytovej tkanki miejskiej, na przykładzie osiedla piastowskiego w Poznaniu.....	65
Galina KALDA, Karolina KWAŚNIAK, Julia SOKOLAN: Analiza źródeł zanieczyszczenia miasta Rzeszowa.....	73
Marek GOSZTYŁA, Stanisław LEŚ, Krystian SIKORSKI: Stary Rynek w Rzeszowie – tynki stosowane w procesie renowacji obiektów zabytkowych. Aspekty technologiczne .....	87
Nadiia SPODYNIUK, Olena GUMEN, Oksana OMELCHUK: Thermal Processes in Industrial Premises with Using Infrared Heating Systems.....	103
Adriana ESTOKOVA, Michaela SMOLAKOVA, Alena LUPTAKOVA: Trends of Co And Mn Leaching from Slag Mortars.....	115

Janusz RAK, Anna MISZTAL: Analiza strat wody w wodociągu miasta Jarosław .....	123
Anna DUDZIŃSKA: Analiza wpływu powierzchni przegród przezroczystych na mikroklimat pasywnego budynku użyteczności publicznej .....	137
Kamil RÓŻYCKI: Efekty energetyczne wybranych wariantów termomodernizacji budynków mieszkalnych .....	145
Alena TAZIKOVA: Environmental Life-Cycle Costs of Building Materials.....	153
Krzysztof JABŁOŃSKI, Włodzimierz STEMPSKI: Rola lasów i leśnictwa w pochłanianiu gazów cieplarnianych.....	161
Krzysztof BARAN, Marcin LEŚKO, Henryk WACHTA: Wizualizacja przedwojennej zabudowy dzielnicy żydowskiej w Przemysłu.....	169
Mateusz SZUBEL, Magdalena PAPKA, Mariusz FILIPOWICZ: Zastosowanie obliczeniowej mechaniki płynów w wielowariantowej analizie homogenicznego spalania produktów zgazowania biomasy.....	177
Krzysztof ŚLEDZIEWSKI: Fatigue Assessment of Bridge Structures According to Eurocodes .....	185
Marek GOSZTYŁA, Agata MIKRUT: Badania budownictwa ludowego na wybranych przykładach historycznych miejscowości łemkowskich .....	205
Natalia KORCZ: Modele numeryczne uwzględniające tarczową pracę pokrycia dachowego z blach trapezowych.....	213
Michał PIĄTKOWSKI: Metody uwzględniania imperfekcji geometrycznych w kratownicach stalowych .....	229
Aleksandra ŚCIUBIDŁO, Przemysław ŚCIUBIDŁO: Wykorzystanie popiołów lotnych w inżynierii środowiska .....	245
Dariusz SZWARKOWSKI: Wpływ wykonania głębokiego wykopu pod budynek wysoki Mogilska Tower w Krakowie na istniejącą zabudowę w ujęciu modelu przestrzennego opartego na metodzie elementów skończonych (MES).....	253

Tadeusz NOCH: Termodynamiczne czynniki robocze stosowane w pompach ciepła.....	267
Halina GARBALIŃSKA, Klaudia NARODOWSKA: Wpływ składu mieszanki i wyjściowego zawilgocenia kruszywa lekkiego na sorpcyjność kapilarną betonu keramzytowego .....	277
Jacek SZTUBECKI, Adam BUJARKIEWICZ, Rafał TEWS, Paulina BRUNKA: Badania odkształceń wieży telekomunikacyjnej poddanej wpływowi nasłonecznienia .....	285
Marcin MALINOWSKI: Dokładność wyznaczania pozycji z zastosowaniem permanentnych usług internetowych PPP (Precise Point Positioning) .....	297
Anna SIKORA, Hanna HREHOROWICZ-GABER: Przekształcenia nowych terytoriów miejskich na przykładzie Rzeszowa.....	315
Wojciech ECKERT: Modernistyczny budynek szpitala w Nowej Soli. Nieznane dzieło Ernsta Koppa. Przykład racjonalizacji funkcji, technologii, konstrukcji .....	323
Radosław PISKORSKI: Modelowanie 3d budynków na potrzeby waloryzacji miejskiego krajobrazu z wykorzystaniem analiz widoczności na przykładzie Krakowa.....	331
Piotr BANASIK, Anna NĘDZA: Możliwości wykorzystania modelu quasi-geoidy w niwelacji.....	343
Marek NALEPKA: Monitorowanie uszkodzeń w ramie żelbetowej.....	351
Agnieszka WDOVIK: Struktura drewna konstrukcyjnego.....	363
Aleksander DUDA: Wybrane sposoby wykorzystania zużytych opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym .....	379
Michał BIENIASZ, Tadeusz GARGULA: Ocena możliwości zastosowania geodezyjnych technik pomiarów do wyznaczania deformacji górotworu na terenie kopalni soli „Kłodawa” .....	395
Marek ŚLUSARSKI, Magdalena JURKIEWICZ: Metody poprawy parametrów dokładnościowych dawnych geodezyjnych osnów pomiarowych.....	415

Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK, Dominika SKOWROŃSKA: Approach to Analyse the State of Health Resorts Base in Podkarpackie Province .....	425
Marian PONIEWIERA, Ewa MACIEJOWSKA-FIGIEL, Justyna ORWAT: Zastosowanie programu GEOLISP do tworzenia dokumentacji kartograficznej odkrywkowego zakładu górniczego.....	435

Barbara TUROŃ<sup>1</sup>  
Dominika ZIAJA<sup>2</sup>  
Bartosz MILLER<sup>3</sup>

## REJESTRACJA I ANALIZA PÓL PRZEMIESZCZEŃ I ODKSZTAŁCEŃ ZA POMOCĄ SYSTEMU CYFROWEJ KORELACJI OBRAZU 3D

W ostatnich latach jako alternatywę dla tradycyjnych metod pomiarowych przemieszczeń i odkształceń zaczęto intensywnie rozwijać metody bezkontaktowego pomiaru opierające się na systemach optyczno-elektronicznych. Jednym z takich bezkontaktowych systemów pomiarowych jest system cyfrowej korelacji obrazu (ang. Digital Image Correlation, DIC), umożliwiający rejestrację i analizę pól przemieszczeń i odkształceń na powierzchni badanego obiektu w przestrzeni trójwymiarowej. W artykule przedstawiono system 3D DIC na przykładzie systemu Q-450 firmy Dantec Dynamics oraz jego zastosowanie w badaniach połączeń elementów konstrukcji stalowych; omówiono zasadę jego działania i etapy badań. Ponadto w pracy opisano zalety i ograniczenia systemu oraz zakres jego zastosowań. Narzędzia analizy pól przemieszczeń i odkształceń dostępne w programie Istra 4D, stanowiącym część systemu Q-450, pozwalają na szczegółowe określenie deformacji próbki i zjawisk zachodzących w czasie jej obciążania oraz stwarzają możliwość różnorodnej wizualizacji wyników badań. Informacje zawarte w artykule mogą być przydatne dla przyszłych użytkowników systemu i przyczynić się do szerszego stosowania metod bezkontaktowych w pomiarach przemieszczeń i odkształceń.

**Słowa kluczowe:** cyfrowa korelacja obrazu (DIC), metody wizyjne, pomiar bezkontaktowy, pomiary przemieszczeń i odkształceń

### 1. Wprowadzenie

Techniki pomiarowe przemieszczeń i odkształceń opierają się głównie na kontaktowych systemach pomiarowych. Stosowanie tych systemów często wiąże się z występowaniem problemów podczas zamocowania czujników po-

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Barbara Turoń, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651622; bturon@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Dominika Ziaja, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651618; dziaja@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Bartosz Miller, Politechnika Rzeszowska, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651623; bartosz.miller@prz.edu.pl

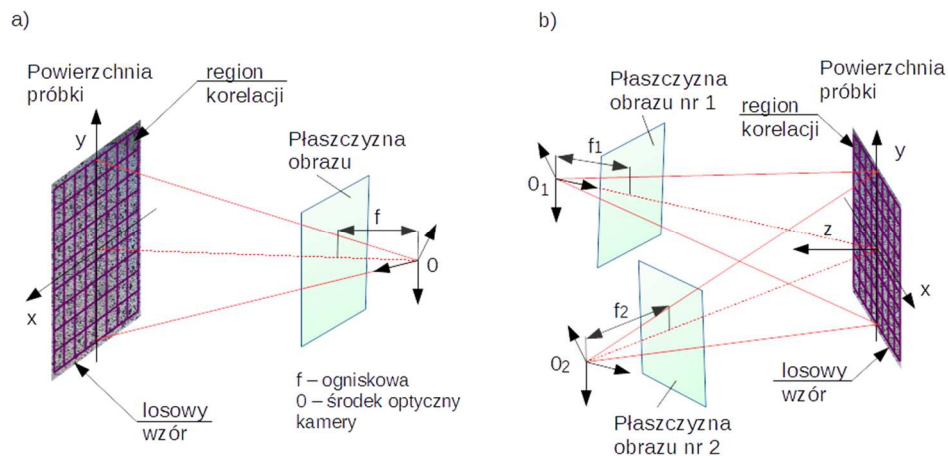
miarowych na powierzchni próbki, a wyniki badań uzyskuje się jedynie w wybranych punktach próbki, w których czujniki te zostały zamocowane. Przeprowadzone w ten sposób pomiary nie dają pełnej informacji o deformacji badanej próbki. Często czujniki kontaktowe można stosować jednorazowo, a podczas badań, np. rozciągania, szybciej ulegają zniszczeniu niż próbka. Ograniczenia, jakie wynikają z tego faktu, nie pozwalają na dokładną analizę mierzonych wielkości. Zastosowanie metod kontaktowych w badaniach laboratoryjnych jest czasochłonne i kosztowne. W związku z tym poszukuje się nowych technik pomiarowych, które zapewnią lepsze możliwości pomiaru przemieszczeń i odkształceń badanych obiektów.

W ostatnich latach jako alternatywę dla tradycyjnych metod pomiarowych przemieszczeń i odkształceń zaczęto intensywnie rozwijać metody bezkontaktowego pomiaru, które opierają się na systemach optyczno-elektronicznych. Metody te ogólnie zwane są metodami wizyjnymi. Tematyka metod wizyjnych podejmowana była w licznych pracach naukowych (np. [1, 2, 3]). Jednym z bezkontaktowych systemów pomiarowych jest system cyfrowej korelacji obrazu, z angielskiego Digital Image Correlation (DIC), umożliwiający rejestrację i analizę pól przemieszczeń i odkształceń na powierzchni badanego obiektu w przestrzeni dwuwymiarowej lub trójwymiarowej w oparciu o korelację obrazów cyfrowych badanego obiektu zarejestrowanych podczas jego przemieszczania się i/lub odkształcania się. Stosowanie metody korelacji obrazu do pomiaru przemieszczeń sięga lat 80 XX wieku [4, 5, 6], jednak dopiero w ostatnich latach intensywne badania pozwoliły na znaczący rozwój i udoskonalenie tej metody, między innymi poprzez wykorzystanie w pomiarach kamer cyfrowych wysokiej rozdzielczości. W polskiej literaturze można znaleźć wiele ciekawych prac związanych z cyfrową korelacją obrazów i jej zastosowaniem w różnych obszarach nauki, jak na przykład prace autorów: Uhl T., Kohut P., Holak K. [7] czy Szymczak T., Kowalewski Z. L., Brodecki A. [8]. Bezkontaktowe metody pomiarowe stanowią alternatywę dla metod badawczych z wykorzystaniem kontaktowych czujników pomiarowych, nie eliminują one wszystkich ograniczeń pomiarów, ale pozwalają na wykonanie pomiarów w przypadkach, w których stosowanie tradycyjnych metod jest utrudnione lub nawet niemożliwe. Metody te stwarzają szersze możliwości badawcze, jak na przykład umożliwiają analizę przemieszczeń i odkształceń na całej badanej powierzchni obiektów, nie ograniczając badań do pomiarów punktowych.

W artykule przedstawiono system cyfrowej korelacji obrazu 3D do pomiaru przemieszczeń i odkształceń na przykładzie systemu Q-450 firmy Dantec Dynamics oraz jego zastosowanie w badaniach połączeń elementów konstrukcji stalowych; omówiono zasadę jego działania i etapy pomiaru, zwracając uwagę na problemy, z jakimi może spotkać się użytkownik systemu. Ponadto w pracy przedstawiono możliwości zastosowania systemu DIC oraz jego zalety i ograniczenia.

## 2. System cyfrowej korelacji obrazu do rejestracji i analizy pól przemieszczeń i odkształceń

Pomiar przemieszczeń i odkształceń metodą cyfrowej korelacji obrazu może być wykonywany przy zastosowaniu układu składającego się z jednej, dwóch lub większej liczby kamer. Zastosowanie jednej kamery pozwala określić przemieszczenia i odkształcenia badanej próbki tylko w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny obrazu kamery (kamera powinna być ustawiona w kierunku prostopadłym do badanej powierzchni próbki), jest to tzw. dwuwymiarowa cyfrowa korelacja obrazu 2D-DIC (Rys. 1a). Korzystanie z co najmniej dwóch kamer rejestrujących obraz badanego obiektu z różnych kierunków umożliwia przeprowadzenie pomiaru przemieszczeń i odkształceń w przestrzeni trójwymiarowej, jest to tzw. przestrzenna cyfrowa korelacja obrazu 3D-DIC (Rys. 1b).

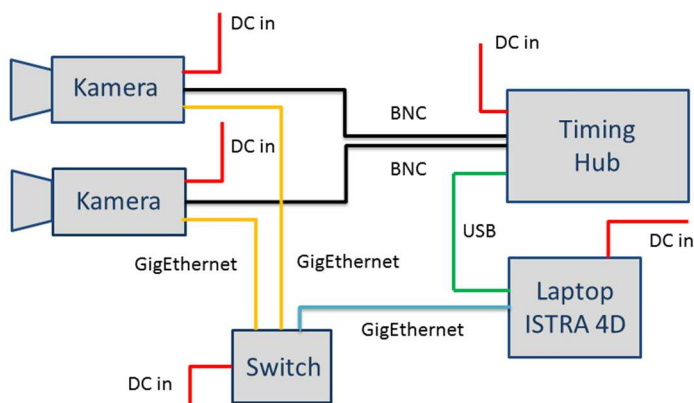


Rys. 1. Cyfrowa korelacja obrazu – 2D-DIC (a) oraz 3D-DIC (b), na podstawie [9]

Fig. 1. Digital image correlation – 2D-DIC (a) and 3D-DIC (b), based on [9]

Aktualnie opracowywane są rozbudowane systemy cyfrowej korelacji obrazu składające się z trzech, czterech, sześciu, a nawet ośmiu kamer, przeznaczone do obserwacji obiektów przestrzennych z kilku kierunków jednocześnie np. do badań obiektów cylindrycznych czy obiektów o skomplikowanym konturze przestrzennym [9, 10, 11].

Przykładem systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiarów 3D jest system Q-450 firmy Dantec Dynamics. Podstawowymi elementami systemu są dwie szybkie kamery z możliwością nagrywania obrazów z częstotliwością do 130 kHz (maksymalna prędkość kamery przy pełnej rozdzielczości obrazu wynoszącej 2560x1600 pikseli wynosi 800 klatek na sekundę). Pozostałe elementy systemu to przenośny komputer z oprogramowaniem Istra 4D, urządzenie wyzwalająco-sterujące Timing Hub synchronizujące układ pomiarowy oraz tablice kalibracyjne. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na Rys. 2 [12, 13].



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego Q-450

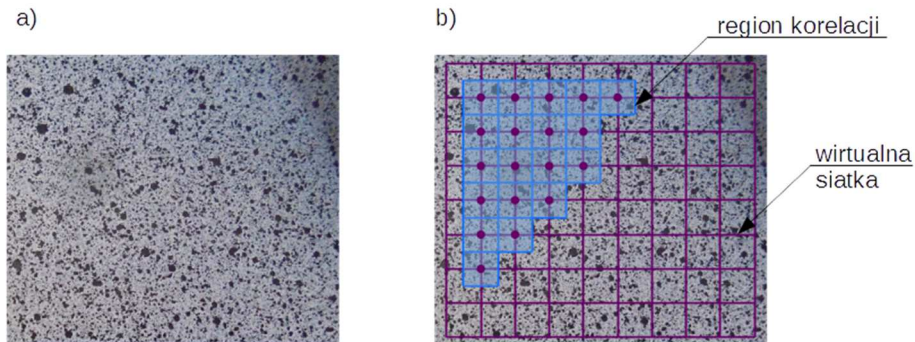
Fig. 2. Measuring system scheme Q-450

Pomiar przemieszczeń i odkształceń z zastosowaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu Q-450 można podzielić na kilka etapów. Badanie rozpoczyna się od przygotowania powierzchni próbki oraz ustawienia stanowiska pomiarowego i kalibracji systemu, następnie wykonuje się pomiar właściwy czyli rejestrację obrazów badanego obiektu podczas jego przemieszczania się i/lub odkształcania się, kolejne etapy badania to analiza obrazów w programie Istra 4D czyli proces tzw. ewaluacji oraz wizualizacja wyników pomiaru [12].

Pomiar metodą DIC polega na wykonaniu zdjęcia badanego obiektu przed jego obciążeniem oraz zarejestrowaniu serii zdjęć po jego obciążeniu, następnie obrazy te są zapisywane i analizowane przez specjalistyczne oprogramowanie. Jeden z obrazów wybierany jest jako referencyjny tj. obraz obiektu niezdeformowanego, na który nakładana jest wirtualna, regularna siatka punktów. Każdy punkt siatki wyznacza środek kwadratowego regionu obrazu zwanego regionem korelacji (Rys. 3) [11, 12]. Każdemu regionowi przyporządkowane są współrzędne jego położenia w określonym układzie współrzędnych (może być to układ związany z kamerą, określony podczas kalibracji systemu na podstawie pierwszego zarejestrowanego zdjęcia tablicy kalibracyjnej lub układ zadany przez użytkownika systemu). Dzięki losowemu wzorowi punktów naniesionemu przed badaniem na powierzchnię badanego obiektu możliwe jest rejestrowanie i analizowanie zmiany kształtu i położenia poszczególnych regionów w trakcie obciążania obiektu, a na ich podstawie określenie przemieszczeń. Oprogramowanie systemu DIC odnajduje pozycję każdego regionu korelacji z obrazu referencyjnego na wszystkich pozostałych zarejestrowanych obrazach, a następnie oblicza przemieszczenia. System DIC Q-450 realizuje obliczenia za pomocą algorytmu korelacji w oparciu o pseudo-afiniczną transformację współrzędnych regionów korelacji wyznaczonych na obrazie referencyjnym badanego obiektu, z uwzględnieniem parametrów transformacji: translacji, rozciągnięcia, ścinania



i dystorsji [14]. Dane wyjściowe uzyskane z pomiarów stanowi zbiór map przemieszczeń, na podstawie których wyznaczane są mapy odkształceń [10,11, 12].



Rys. 3. Powierzchnia próbki – losowy wzór (a) oraz wirtualna siatka punktów i regionów korelacji (b), na podstawie [11]

Fig. 3. Sample surface – random pattern (a) and points of the virtual grid and facets grid (b) [11]

### 3. Zalety, ograniczenia i możliwości zastosowania systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D

System cyfrowej korelacji obrazu 3D w stosunku do innych metod badawczych daje dodatkowe możliwości pomiarowe, ale także, jak każda metoda pomiarowa, posiada pewne ograniczenia. Do zalet systemu można zaliczyć [13, 15, 16]:

- bezkontaktowość pomiaru,
- łatwość wykorzystania systemu w warunkach laboratoryjnych jak i polowych,
- możliwość pomiaru przemieszczeń i odkształceń zarówno na płaszczyźnie jak i w przestrzeni trójwymiarowej,
- uzyskanie powierzchniowych obrazów przemieszczeń i odkształceń,
- pomiar przemieszczeń i odkształceń jest możliwy we wszystkich kierunkach tj. wzdłuż osi  $x$ ,  $y$ ,  $z$  w dowolnie przyjętym układzie współrzędnych,
- możliwość badania próbek o dowolnym kształcie i wykonanych z dowolnego materiału, badana powierzchnia próbki nie musi być płaska,
- możliwość pomiaru przemieszczeń i odkształceń próbek różnej wielkości, od mikroprobek badanych przy użyciu mikroskopu do obiektów wielkogabarytowych jak np. fragmenty mostów.

Najistotniejsze ograniczenia systemu to [15, 16]:

- konieczność przygotowania powierzchni próbki,
- konieczność wykorzystania sztucznego światła przy rejestracji obrazów z bardzo dużą częstotliwością,
- zależność systemu od warunków oświetlenia naturalnego,
- konieczność posiadania tablic kalibracyjnych odpowiednich do wielkości badanego obszaru próbki,

- wysoka intensywność obliczeń i długi czas oczekiwania na końcowe wyniki badań,
- archiwizowanie zarejestrowanych obrazów i uzyskanych wyników badań wymaga pojemnych nośników pamięci,
- czasochłonne przegrywanie danych na nośniki pamięci.

Zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D pozwala między innymi na [13, 14, 15, 16]:

- określenie dokładnego kształtu badanej próbki,
- badanie komponentów i materiałów w zakresie przemieszczeń i odkształceń,
- wyznaczenie współczynnika Poissona i modułu Younga badanego materiału,
- wykrywanie uszkodzeń, rys i pęknięć,
- pomiar drgań i analizę modalną,
- walidację modeli numerycznych MES.

W tabeli 1 przeprowadzono analizę porównawczą metody cyfrowej korelacji obrazu 3D oraz tradycyjnej metody pomiarowej z wykorzystaniem tensometrów.

Tabela 1. Porównanie metody cyfrowej korelacji obrazu 3D z pomiarami z zastosowaniem tensometrów [13, 17]

Table 1. Comparison of 3D digital image correlation method with measurements by using tensometers [13, 17]

System cyfrowej korelacji obrazu 3D	Tensometry
Pomiar bezkontaktowy	Pomiar kontaktowy
Brak wpływu zmiany temperatury powierzchni badanej próbki na sprzęt pomiarowy	Wpływ temperatury powierzchni badanej próbki na sprzęt pomiarowy
Wymagane dokładne oczyszczenie powierzchni próbki przed badaniem	Wymagane dokładne oczyszczenie powierzchni próbki przed badaniem
Szybkie przygotowanie na powierzchni próbki losowego wzoru czarnych kropek na białym tle przez natryskiwanie farby	Czasochłonny proces umieszczania na powierzchni próbki tensometru (klejenie, lutowanie itp.)
Nieograniczona liczba pomiarów z wykorzystaniem systemu DIC	Tensometr może być użyty jednorazowo (raz naklejonych tensometrów nie da się odkleić bez ich uszkodzenia)
Możliwość pomiaru przemieszczeń i odkształceń na płaszczyźnie lub w przestrzeni trójwymiarowej, we wszystkich kierunkach (wzdłuż osi $x$ , $y$ , $z$ w dowolnym układzie współrzędnych)	Pomiar odkształceń tylko w wybranym kierunku
Chropowatość powierzchni nie ogranicza możliwości pomiarowych systemu	Powierzchnia, na którą naklejany jest tensometr, musi być płaska
Uzyskanie powierzchniowych obrazów przemieszczeń i odkształceń	Uzyskanie wyników w wybranych punktach próbki tj. tylko w punktach, w których przytoczone zostały czujniki pomiarowe
Możliwość pomiaru rzeczywistych maksymalnych przemieszczeń i odkształceń	Pomiar ograniczony przez graniczne odkształcenie tensometru

#### **4. Zastosowanie systemu Q-450 do rejestracji i analizy pól przemieszczeń i odkształceń w badaniach połączeń elementów konstrukcji stalowych**

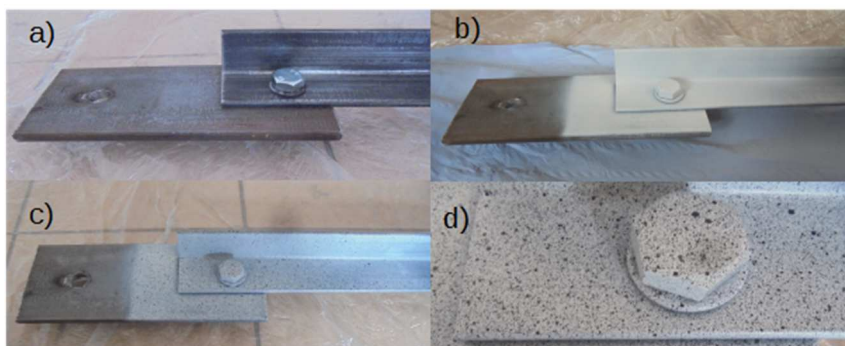
System cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450 został wykorzystany na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej w badaniach połączeń spawanych i śrubowych elementów konstrukcji stalowych. Przebadano następujące elementy: kątowniki równoramienne łączone z blachami węzłowymi za pomocą jednej śruby [18] oraz kątowniki nierównoramienne łączone z blachami węzłowymi poprzez spawanie [19].

W przypadku połączeń śrubowych do badań wykorzystano elementy wykonane z kątowników równoramiennych o rozmiarach L50x5, L60x6 i L80x6 o długości 500 mm każdy, łączonych tym samym ramieniem do dwóch blach węzłowych (bl.10x100), za pomocą jednego łącznika śrubowego w każdym styku. Próbki imitowały elementy konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia [18].

W przypadku połączeń spawanych próbki składały się ze stalowego walcowanego kształownika o przekroju kątownika nierównoramiennego L80x40x6 długości 1 m połączonego za pomocą spoin na jedno ramię z dwoma blachami o wymiarach 250 mm x 100 mm i grubości 8 mm, które odpowiadały blachom węzłowym. Próbki imitowały elementy konstrukcji kratowych takie jak więzary dachowe czy płatwie [19].

Celem badania było uzyskanie map przemieszczeń i odkształceń w obszarze połączenia kształowników z blachą węzłową za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu, które mogą zostać wykorzystane do analizy i oceny nośności połączeń oraz posłużyć do walidacji modeli numerycznych.

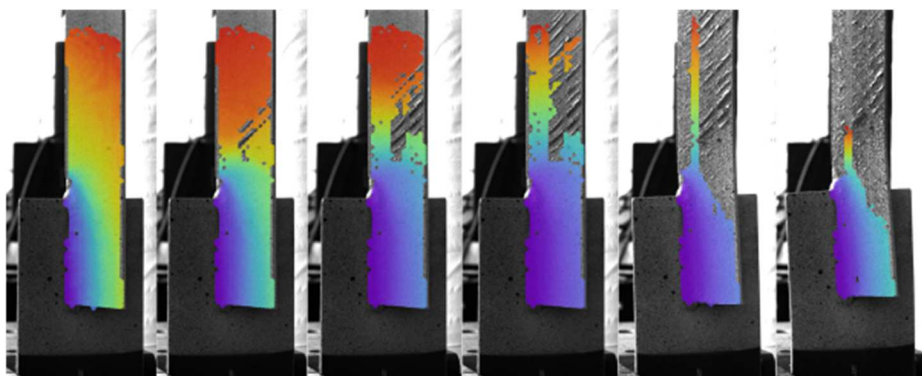
Pierwszym etapem badania było przygotowanie w odpowiedni sposób powierzchni próbek. Kształowniki i blachy węzłowe zostały dokładnie oczyszczone w obrębie badanego obszaru połączenia. Na próbki naniesiono biały podkład, a następnie metodą natryskiwania wykonano na białej powierzchni losowy wzór punktów. Zagęszczenie wzoru zostało dostosowane do wielkości badanego obszaru. Etapy przygotowania próbek do badania systemem cyfrowej korelacji obrazu Q-450 przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Przygotowanie próbki do badania – oczyszczenie powierzchni (a), nałożenie białego podkładu (b), naniesienie czarnych kropek (b), efekt końcowy (d)

Fig. 4. Sample preparation for test – cleaning of the surface (a), applying white underlay (b), applying black dots (b), the final result (d)

Najczęstszym błędem popełnianym podczas przygotowania próbki jest niewłaściwe oczyszczenie powierzchni (przy spodziewanych dużych odkształceniach próbki bardzo ważne jest, aby przyczepność farby do powierzchni próbki była jak największa, inaczej naniesiony wzór prawdopodobnie ulegnie zniszczeniu podczas obciążania obiektu (Rys. 5)) oraz naniesienie zbyt dużej ilości białego podkładu, przez co powierzchnia staje się błyszcząca i odbija światło, a w konsekwencji jest pomijana w dalszej analizie.



Rys. 5. Zmniejszenie analizowanego obszaru spowodowane utratą wzoru na powierzchni próbki  
Fig. 5. Reduction of the analyzed sample area due to the loss of the pattern on the sample surface

Zagęszczenie i wielkość wzoru na powierzchni próbki powinny być odpowiednio dobrane do wielkości badanego obszaru próbki tak, aby w każdym regionie korelacji, wyznaczonym w programie Istra 4D na obrazie referencyjnym badanego obiektu, znajdował się charakterystyczny fragment biało-czarnego

wzoru. Z kolei wielkość badanego obszaru wpływa na wybór tablicy kalibracyjnej służącej do kalibracji systemu. Tablica dobierana jest do rozmiaru badanego obszaru w taki sposób, aby wzór szachownicy znajdujący się na tablicy wypełniał w pełni obraz w każdej kamerze wykorzystanej do pomiarów.

Drugim etapem badań było przygotowanie stanowiska pomiarowego, w tym odpowiednie ustawienie kamer. Obiekt powinien być obserwowany przez kamery z dwóch kierunków. Kamery należy ustawić tak, aby badany obszar znajdował się centralnie w środku pola widzenia obu kamer, a kąt między kamerami powinien wynosić od 40 do 60 stopni [12]. Bardzo ważną kwestią przy przygotowywaniu stanowiska pomiarowego jest zapewnienie prawidłowego oświetlenia badanego obiektu. Korzystanie z oświetlenia naturalnego zalecane jest przy krótkich pomiarach oraz przy pomiarach z niską częstotliwością rejestracji obrazów. Przy długich pomiarach, aby uzyskać stabilne warunki oświetlenia, korzystne jest zastosowanie sztucznego oświetlenia np. lamp ksenonowych, oświetlenia stroboskopowego czy ultra jasnego LED. Oświetlenie sztuczne stosuje się również przy pomiarach z dużą częstotliwością rejestracji obrazów, gdyż oświetlenie naturalne jest w takich przypadkach zazwyczaj niewystarczające.

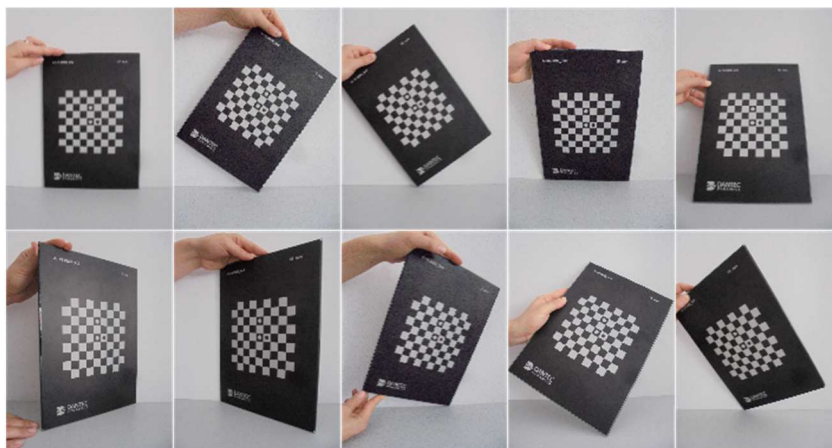
Stanowisko pomiarowe do badań laboratoryjnych składało się z maszyny wytrzymałościowej firmy INSTRON oraz z systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450. W badaniu wykorzystano dwie kamery cyfrowe Phantom v341, zamocowane na oddzielnych statywach oraz obiektywy z ogniskową 50 mm. Podczas pomiarów nie wykorzystywano sztucznego oświetlenia, gdyż oświetlenie naturalne było stabilne i wystarczające dla zapewnienia odpowiednich warunków badania. Stanowisko laboratoryjne przedstawiono na Rys. 6.



Rys. 6. Stanowisko pomiarowe

Fig. 6. Measurement set-up

Kolejnym etapem pomiaru przemieszczeń i odkształceń połączeń elementów konstrukcji stalowych była kalibracja systemu. Kalibrację wykonuje się przy pomocy specjalnie przeznaczonych do tego tablic kalibracyjnych. Proces kalibracji polega na zarejestrowaniu minimum ośmiu obrazów tablicy kalibracyjnej umieszczonej w polu widzenia kamer w różnych położeniach. Zalecane pozycje tablicy w czasie kalibracji systemu Q-450 przedstawiono na Rys. 7 [12, 13]. System oblicza wewnętrzne i zewnętrzne parametry kalibracji, których ustalenie jest niezbędne do analizy geometrii obiektu i przeniesienia wszystkich punktów z obrazów zarejestrowanych przez kamery z płaszczyzny do przestrzeni. Wewnętrzne parametry kalibracji ustalane podczas kalibracji systemu DIC to długość ogniskowej  $f$  ( $f_x$ ,  $f_y$ ), punkt główny  $PP$  ( $x_0$ ,  $y_0$ ) oraz składowe dystorsji. Zewnętrzne parametry kalibracji określają pozycję kamery w odniesieniu do wstępnego układu współrzędnych ustalonego na podstawie pierwszego zarejestrowanego obrazu tablicy kalibracyjnej w procesie kalibracji. Zewnętrzne parametry kalibracji to wektor przesunięcia  $T$  ( $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ ) oraz wektor rotacji  $R$  ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ).



Rys. 7. Zalecane pozycje tablicy kalibracyjnej w procesie kalibracji

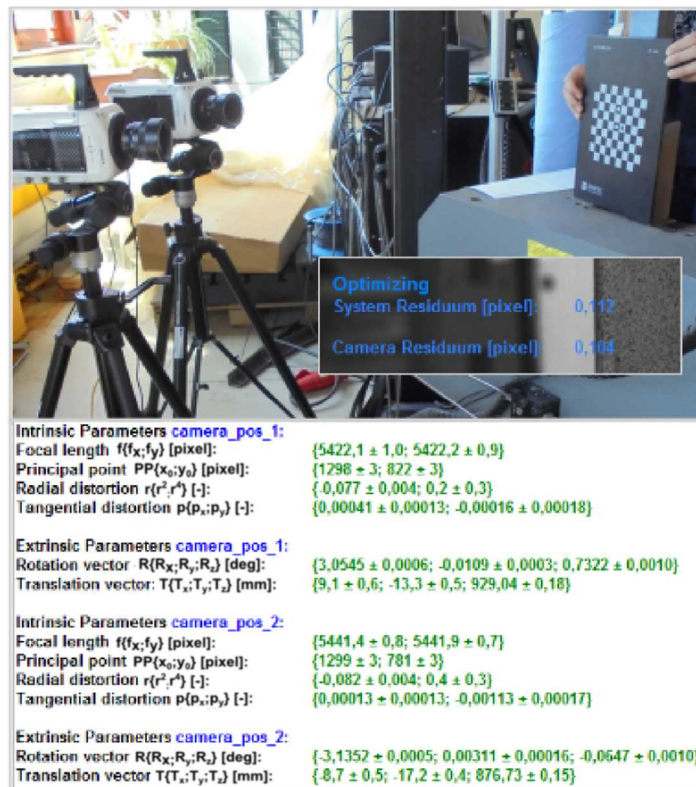
Fig. 7. Recommended positions of the calibration target during the calibration process

Proces kalibracji można wykonywać na kilka sposobów. Najczęściej wykonuje się kalibrację dwóch kamer jednocześnie tzw. kalibrację pełną. W niektórych przypadkach konieczne jest niezależne ustalenie parametrów wewnętrznych i zewnętrznych kalibracji albo wykonanie kalibracji oddzielnie dla każdej kamery. Kalkulacja parametrów kalibracji odbywa się za pomocą algorytmu optymalizacji, który określa średnią niedokładność odnalezionych na zarejestrowanych obrazach znaczników (narożników kwadratów szachownicy tablicy kalibracyjnej) w jednostce pikseli, tzw. residuum. Wartość ta jest miarą niedokładności obliczanych parametrów czyli parametrem jakości procesu kalibracji i powinna



być mniejsza od wartości 0,3 do 0,5 w zależności od rodzaju zastosowanej tablicy kalibracyjnej. Wartość residuum powyżej 1,0 oznacza pojawienie się błędu podczas kalibracji i w takim przypadku proces kalibracji należy powtórzyć [12]. Najczęstszym błędem popełnianym przy kalibracji jest nieodpowiednie pozycjonowanie tablicy, a także niezapewnienie prawidłowego oświetlenia tablicy lub nieprawidłowe ustawienie ostrości obiektywu. Ilekroć zmieniane jest położenie kamer albo ustawienia obrazu (ostrość, przesłona), należy przeprowadzić nową kalibrację. Jak już wcześniej wspomniano domyślny układ współrzędnych w programie Istra 4D, w którym wyznaczane są wartości przemieszczeń i odkształceń, określany jest podczas procesu kalibracji na podstawie pierwszego zdjęcia tablicy kalibracyjnej, dlatego ważne jest dokładne ustawienie pożądanego położenia tablicy na etapie rejestracji pierwszego zdjęcia.

Do kalibracji systemu zastosowano tablicę kalibracyjną o wymiarach 21 cm × 30 cm. Wykonano kalibrację pełną. Uzyskane wartości parametrów kalibracji przedstawiono na Rys. 8. Wartość residuum była prawidłowa i wyniosła 0,112 piksela.



Rys. 8. Parametry kalibracji systemu DIC

Fig. 8. Calibration parameters of DIC system

Kolejnym etapem badania była rejestracja obrazów. Obrazy rejestrowane podczas jednego pomiaru tworzą pojedynczą serię danych. Obrazy można rejestrować w sposób manualny lub w sposób ciągły z wybraną stałą częstotliwością do bufora pamięci kamery (o pojemności 32 GB). Pomiar przemieszczeń i odkształceń kształtowników stalowych łączonych za pomocą jednej śruby oraz łączonych poprzez spawanie przeprowadzono podczas statycznej próby rozciągania. Rejestracja obrazów przeprowadzona została w sposób ciągły z częstotliwością 1 Hz. Obrazy uzyskano w każdej sekundzie badania.

Zarejestrowane systemem Q-450 obrazy badanych połączeń zostały następnie przeanalizowane w programie Istra 4D. Specjalistyczne oprogramowanie analizuje kolejno zapisane w czasie obciążania próbki obrazy serii pomiarowej, jest to tzw. proces ewaluacji danych. Proces ten polega na wyznaczeniu przestrzennych współrzędnych badanego obiektu dla każdego pojedynczego kroku pomiarowego, a więc obrazu zarejestrowanego przez każdą z kamer, w oparciu o parametry kalibracji wyznaczone w procesie kalibracji oraz ustalone przez użytkownika parametry korelacji obrazu.

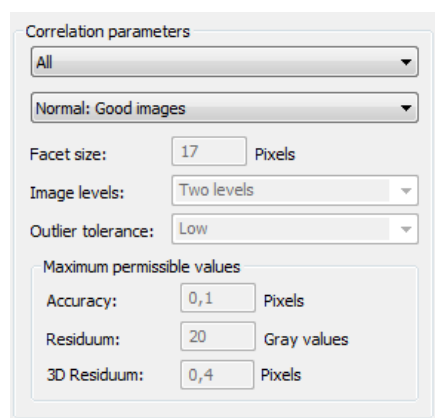
Użytkownik systemu poprzez modyfikację parametrów korelacji może wpływać na szybkość i dokładność procesu korelacji. Parametry, które można definiować w programie Istra 4D, to wielkość okna korelacji *Facet Size*, liczba poziomów rozkładu przestrzennego *Image Levels* oraz poziom tolerancji *Outlier Tolerance*. Wielkość okna korelacji wyrażana jest w pikselach. Minimalny wymiar okna korelacji jest ściśle powiązany z rozmiarem stochastycznego wzoru na badanej powierzchni próbki (każdy region korelacji musi zawierać charakterystyczną część wzoru o kontrastowych cechach). Zwiększenie wymiaru regionu korelacji obniża dokładność pomiarów, ale skraca czas procesu korelacji obrazów. Liczba poziomów *Image Levels* również wpływa na szybkość i dokładność korelacji, im większa liczba poziomów rozkładu przestrzennego, tym proces korelacji jest dłuższy, ale dokładniejszy, mniejsza liczba poziomów zwiększa szybkość korelacji, ale równocześnie zwiększa ryzyko uzyskania nieprawdziwych wyników. Parametr tolerancji *Outlier Tolerance* może być niski, wysoki lub średni. Wysoki i średni poziom tolerancji znacząco wydłuża proces korelacji, ale jest zalecany dla obrazów złej jakości, z refleksami. Przy wysokim poziomie tolerancji zakłócenia na obrazie w postaci prześwietleń mają niewielki wpływ na wynik korelacji. W procesie korelacji określana jest również odległość (wyrażana w pikselach) między punktami wirtualnej siatki nałożonej w programie na obraz próbki. Rozmiar okna wirtualnej siatki determinuje dokładność pomiarów. Im gęściejsza jest siatka, tym więcej jest punktów pomiarowych na analizowanej powierzchni badanego obiektu. Wymiar regionu korelacji powinien odpowiadać  $4/3$  odległości między punktami wirtualnej siatki.

Użytkownik systemu Q-450 może wybrać predefiniowane zestawy parametrów korelacji: zaawansowany *Advanced – Full User Defined* – wszystkie ustawienia mogą być definiowane przez użytkownika, normalny *Normal–Good Images* – domyślny zestaw parametrów dla obrazów dobrej jakości, normalny

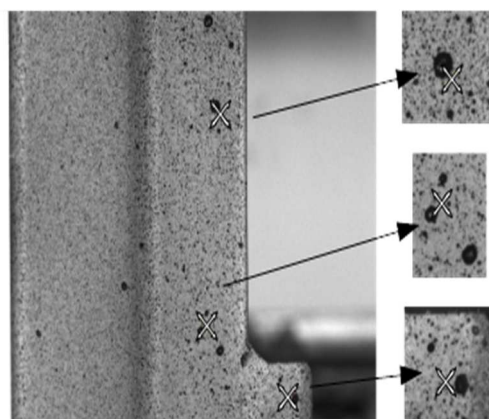


*Normal-Bad Images* – domyślny zestaw parametrów dla obrazów złej jakości (z refleksami), szybki *Fast* – zestaw parametrów optymalizujący szybkość korelacji kosztem jakości oraz zestaw parametrów wysokiej jakości *High Accuracy* – optymalizujący dokładność korelacji kosztem szybkości.

W badaniach połączeń elementów konstrukcji stalowych wybrano zestaw parametrów korelacji *Normal-Good Images* (Rys. 9). Przy tak zdefiniowanych parametrach korelacji przeprowadzono proces ewaluacji obrazów zarejestrowanych podczas obciążania próbek.



Rys. 9. Parametry korelacji  
Fig. 9. Corelation parameters



Rys. 10. Rozmieszczenie punktów startowych w charakterystycznych miejscach losowego wzoru

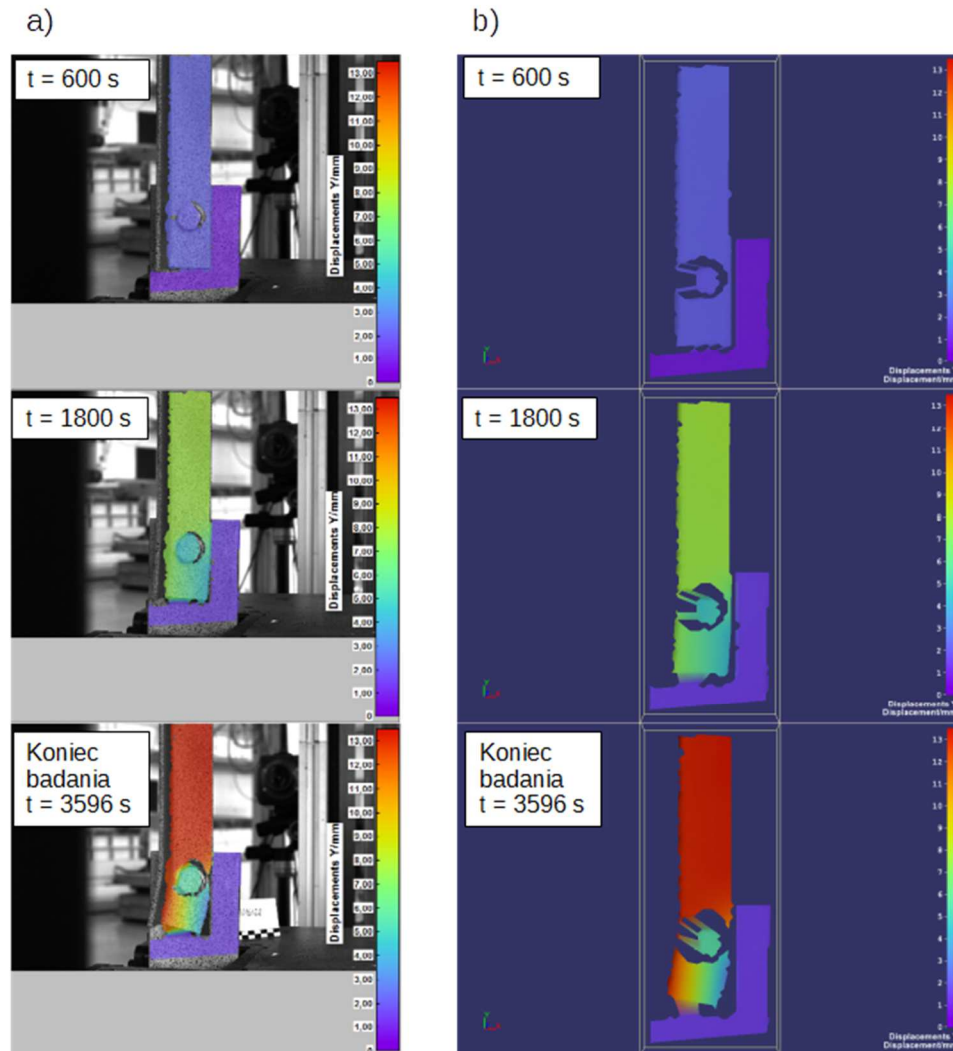
Fig. 10. Location of the Startpoints in characteristic fragment of the random pattern

Proces ewaluacji odbywał się dwuetapowo. Pierwszy etap to ewaluacja częściowa, która polega na wskazaniu przez użytkownika systemu charakterystycznych punktów na badanej powierzchni – tzw. punktów startowych (ang. startpoints) oraz automatycznym odnajdywaniu przez program tych punktów na kolejnych obrazach serii pomiarowej. Proces korelacji ogranicza się więc na tym etapie tylko do konkretnych punktów badanego obszaru. Drugi etap ewaluacji to ewaluacja pełna, a więc obejmująca wszystkie punkty obrazu [12]. Trudność dla użytkownika systemu może stanowić dobór odpowiednich punktów startowych. Punkty należy wybierać w charakterystycznych miejscach losowego wzoru niesionego na próbce, jak pokazano na Rys. 10, należy także pamiętać, że źle ustawiona ostrość, niewłaściwe oświetlenie próbki (zbyt ciemny albo prześwietlony obraz) lub umieszczanie punktów startowych na fragmentach obrazu, w obrębie których na dalszych zdjęciach serii pomiarowej utracony zostaje losowy wzór, może spowodować zatrzymanie procesu ewaluacji.

Ostatnim etapem badań połączeń elementów konstrukcji stalowych systemem cyfrowej korelacji obrazu była analiza i wizualizacja wyników. Program Istra 4D pozwala na wyznaczenie konturu przestrzennego badanego obiektu, przemieszczeń na kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , przemieszczenia całkowitego, wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych przemieszczeń, odkształceń stycznych na kierunkach  $x$  i  $y$ , odkształcenia kąтового, odkształceń na kierunkach głównych oraz wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych wartości odkształceń, dla każdego analizowanego punktu próbki. Obliczone przez program wartości przemieszczeń i odkształceń można eksportować do plików zewnętrznych lub przestawić w postaci kolorowych map. Wizualizacja wyników w programie Istra 4D może odbywać się na płaszczyźnie lub w przestrzeni trójwymiarowej. Program daje możliwość definiowania na analizowanej powierzchni badanego obiektu punktów, linii oraz obszarów o różnym kształcie, dla których można uzyskać dodatkowe informacje np. dla dowolnie wybranego punktu wyznaczyć wykres przedstawiający zmianę przemieszczenia lub odkształcenia w czasie. Istotną kwestią na etapie wizualizacji jest dobór układu współrzędnych, w odniesieniu do którego będą obliczane wartości przemieszczeń i odkształceń [12]. Należy pamiętać, że za domyślny układ współrzędnych program przyjmuje układ zdefiniowany na podstawie pierwszego zdjęcia tablicy kalibracyjnej w procesie kalibracji. Wstępnie przyjęty przez program układ współrzędnych można jednak zmieniać, program Istra 4D daje bowiem możliwość definiowania własnego układu współrzędnych. Warto zaznaczyć, że wszystkie wartości przemieszczeń i odkształceń dla pozostałych obrazów w serii pomiarowej są obliczane w odniesieniu do wartości uzyskanych dla wybranego na etapie wizualizacji obrazu referencyjnego.

Oprogramowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu stanowi jego integralną część zawierającą moduły obliczeniowe, w przypadku których ocena ich działania i modyfikacja nie jest możliwa [8]. Dla wyznaczonych wartości przemieszczeń i odkształceń program Istra 4D automatycznie podaje wartości błędów pomiarowych. Dokładność algorytmu korelacji wynosi około 0,01 piksela, jest więc ona ściśle związana z rozdzielczością obrazów [13, 16].

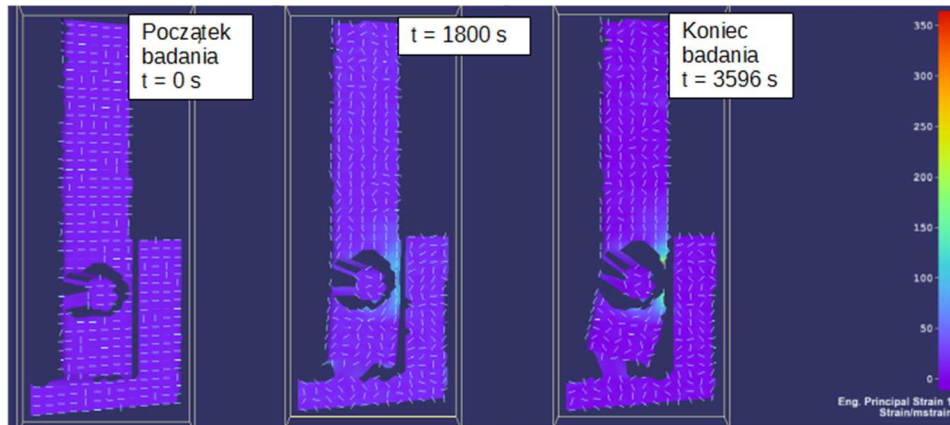
Na Rys. 11 przedstawiono przykładowe mapy przemieszczeń uzyskane z badań kątowników łączonych za pomocą jednej śruby. Są to przemieszczenia pionowe (w kierunku rozciągania próbki) w różnych fazach wyężenia kątownika (po 600 s rozciągania próbki, w 1800 s badania oraz w chwili zniszczenia próbki tj. w 3596 s badania). Mapy zostały zaprezentowane w płaskim układzie odniesienia (Rys. 11a) oraz w układzie przestrzennym (Rys. 11b). Rysunek 12 przedstawia mapy odkształceń głównych wraz z kierunkami głównymi pokazane w przestrzennym układzie odniesienia w chwili rozpoczęcia badania, po 1800 s oraz w chwili zakończenia badania tj. w 3596 s.



Rys. 11. Mapy przemieszczeń w kierunku osi podłużnej próbki – w płaskim układzie odniesienia (a), w przestrzennym układzie odniesienia (b)

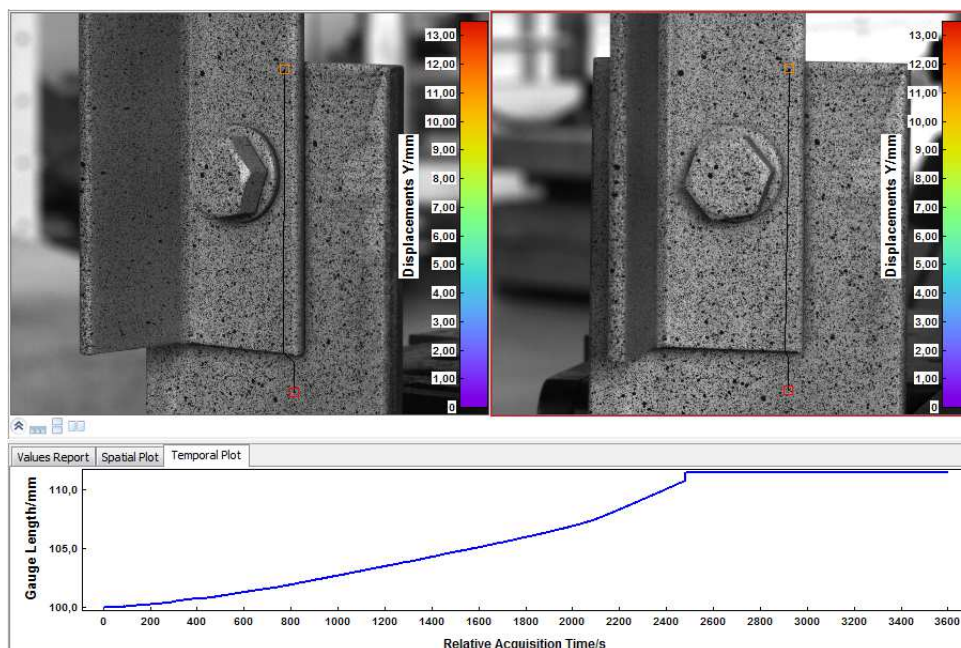
Fig. 11. Displacement maps in the direction of the longitudinal axis of the sample – in the plane reference system (a), in the spatial reference system (b)

W badaniach wykorzystano również funkcję ekstensometru. Rysunek 13 przedstawia zdefiniowany liniowy element (o długości 100 mm) dla którego zastosowano funkcję ekstensometru oraz wygenerowany w programie Istra 4D wykres zmiany odległości między dwoma wybranymi punktami próbki (początek i koniec elementu liniowego) w czasie obciążania próbki.



Rys. 12. Mapy odkształceń głównych

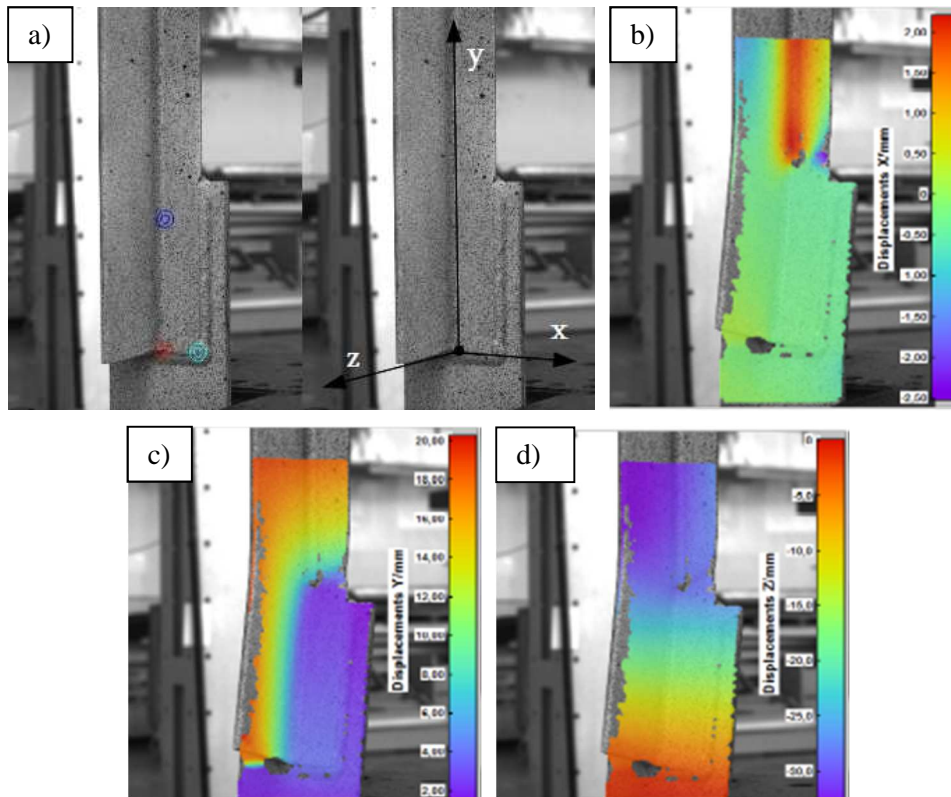
Fig. 12. Principal strain maps



Rys. 13. Element liniowy zdefiniowany w programie Istra 4D i wykres zmiany długości tego elementu w czasie

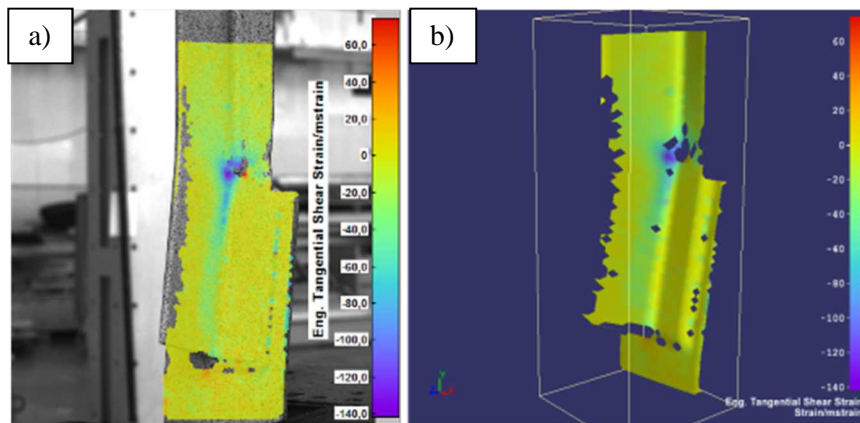
Fig. 13. Linear element defined in the Istra 4D and the temporal plot of the linear element length

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki pomiaru otrzymane z badań kątowników łączonych poprzez spawanie. Zniszczenie próbki nastąpiło w 2320 s badania, a maksymalne wartości odkształceń próbka uzyskała w 2318 s.



Rys. 14. Mapy przemieszczeń w układzie osi  $xyz$  – układ współrzędnych zdefiniowany w programie Istra 4D (a), przemieszczenia  $x$  (b), przemieszczenia  $y$  (c), przemieszczenia  $z$  (d)

Fig. 14. Displacement maps in coordinate system  $xyz$  – ucoordinate system defined in Istra 4D (a),  $x$  displacement (b),  $y$  displacement (c),  $z$  displacement (d)



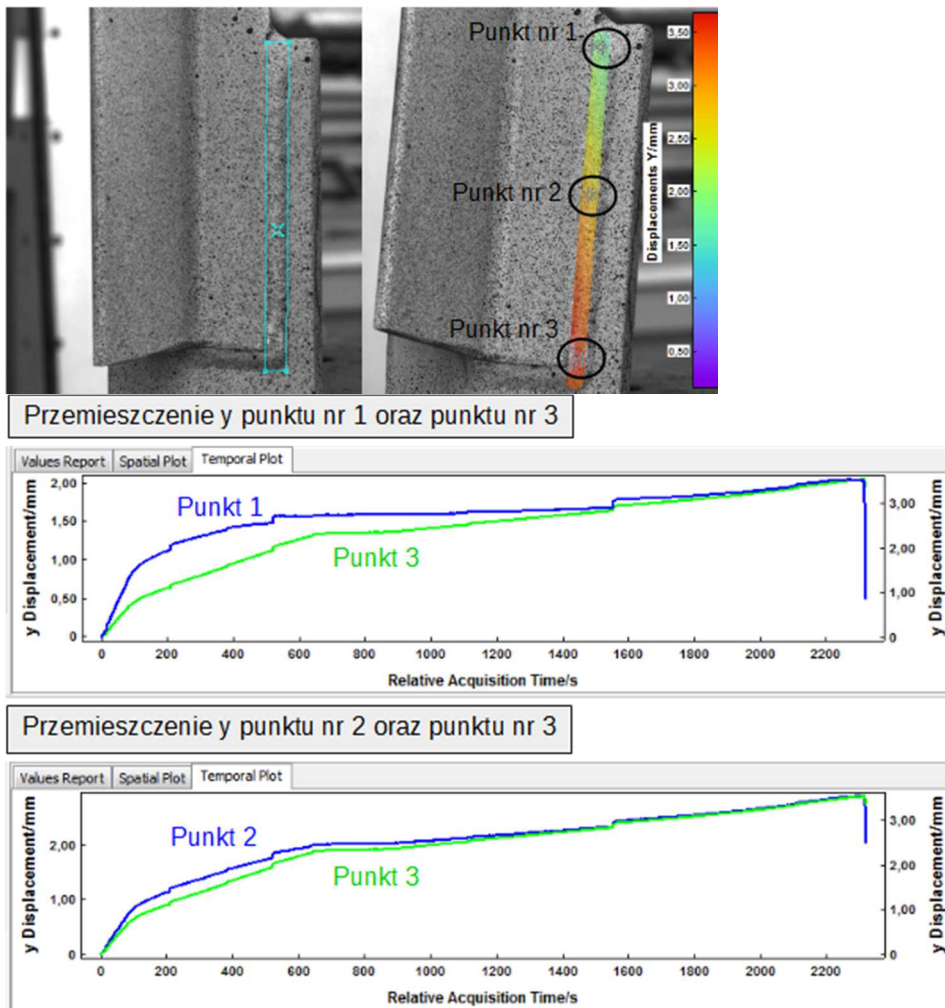
Rys. 15. Mapa odkształcenia kąтового w chwili  $t = 2318$  s – 2D (a), 3D (b)

Fig. 15. Tangential Shear Strain for  $t = 2318$  s – 2D (a), 3D (b)



Na Rys. 14 przedstawiono zdefiniowany w programie Istra 4D układ współrzędnych, w którym odczytano wyniki badań oraz mapy przemieszczeń na kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$  w 2318 s badania. Na Rys. 15 przedstawiono mapę odkształcenia kąтового w chwili  $t = 2318$  s.

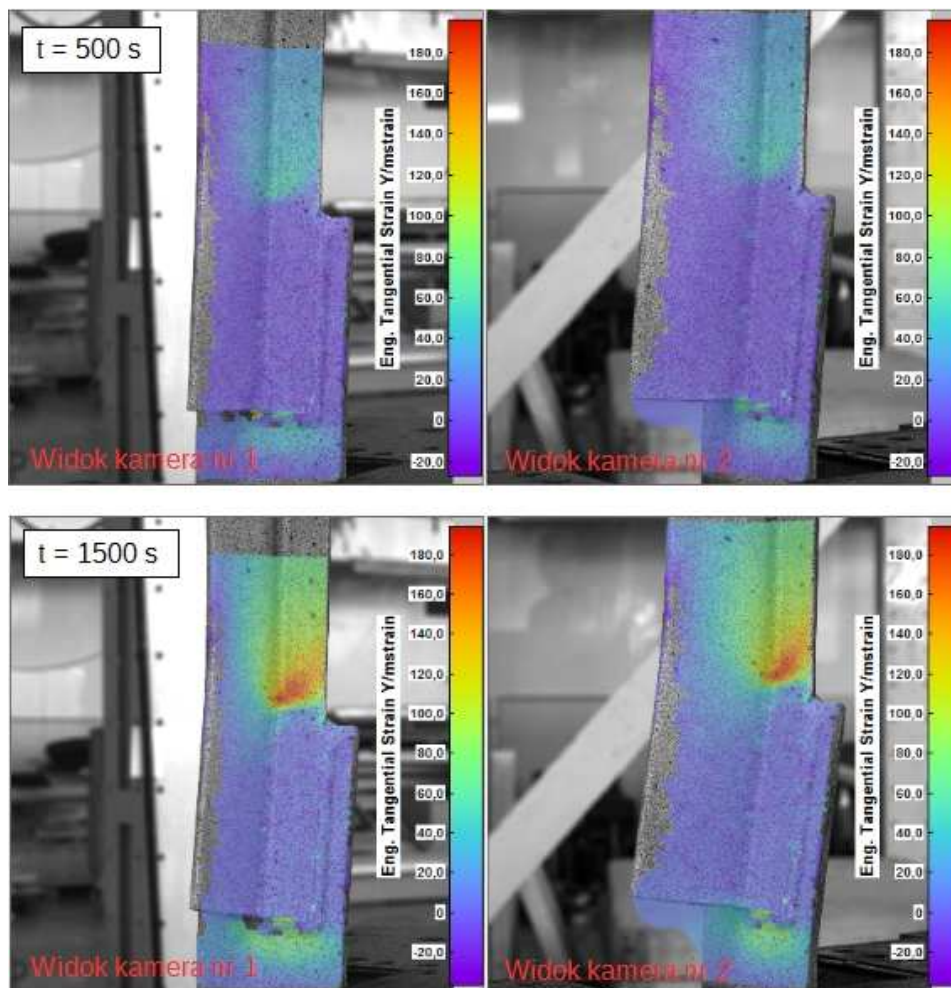
Następnie zawężono analizę pól przemieszczeń i odkształceń do obszaru samej spoiny podłużnej. Na Rys. 16 pokazano analizowany obszar próbki, mapę przemieszczeń w kierunku osi  $y$  dla spoiny podłużnej próbki oraz porównano przemieszczenia  $y$  wybranych punktów spoiny w czasie.



Rys. 16. Analiza przemieszczeń w obszarze spoiny

Fig. 16. Analysis of displacement in the weld area

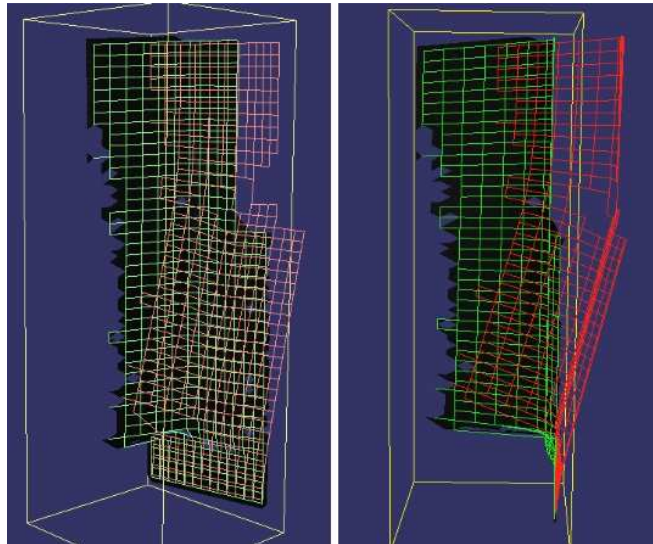
Analizując pola przemieszczeń i odkształceń można zaobserwować inicjację zniszczenia próbki. Miejsca koncentracji odkształceń stycznych y zaobserwowano w okolicy spoiny poprzecznej oraz krótszego ramienia kątownika powyżej połączenia z blachą, w narożu kątownika, co widać na mapach odkształceń przedstawionych na Rys. 17.



Rys. 17. Inicjacja zniszczenia próbki

Fig. 17. Initiation of sample destruction

Na Rys. 18 pokazano deformację badanego obiektu w przestrzeni trójwymiarowej. Zielona siatka nałożona na obiekt obrazuje stan próbki przed deformacją, czerwona siatka pokazuje postać zdeformowaną próbki. Rysunek został wyeksportowany z programu Istra 4D.



Rys. 18. Deformacja próbki w 3D – widok z dwóch kamer

Fig. 18. 3D sample deformation – view from two cameras

## 5. Podsumowanie

System cyfrowej korelacji obrazu daje nowe możliwości badawcze w zakresie pomiaru przemieszczeń i odkształceń w stosunku do tradycyjnych metod pomiarowych. Metoda DIC pozwala na szczegółową analizę mierzonych wielkości na całym obszarze badanej próbki. Szeroka analiza pól przemieszczeń i odkształceń za pomocą różnych narzędzi dostępnych w programie Istra 4D, będącym częścią systemu cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450, pozwala na bardzo szczegółowe określenie deformacji próbki i zjawisk zachodzących w czasie obciążania próbki oraz stwarza możliwości różnorodnej wizualizacji wyników badań.

W artykule przedstawiono system cyfrowej korelacji obrazu 3D Q-450 oraz przykładowe zastosowanie tego systemu do rejestracji pól przemieszczeń i odkształceń połączeń śrubowych i spawanych elementów konstrukcji stalowych. Zawarte w artykule wskazówki dotyczące wykonywania pomiarów za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu mogą być przydatne dla kolejnych użytkowników systemu i przyczynić się do szerszego stosowania metod bezkontaktowych w pomiarach przemieszczeń i odkształceń.



## Literatura

- [1] Kohut P., Kurowski P.: Zastosowanie trójwymiarowych technik wizyjnych do pomiaru i analizy drgań, *Diagnostyka*, nr 3, 2007, s. 55-63.
- [2] Kubit A., Mączka T.: Zastosowanie techniki wizyjnej w pomiarze odkształcenia bezwzględnego warstwy kleju w spoinie, *Pomiary Automatyka Robotyka*, R. 16, nr 5, 2012, s. 91-97.
- [3] Dietrich L., Grzywna P., Kukla D., Wykorzystanie metod optycznych do lokalizacji uszkodzeń zmęczeniowych, *Przegląd Spawalnictwa*, R. 84, nr 13, 2012, s. 16-18.
- [4] Chu T. C., Ranson W. F., Sutton M. A., Peters W. H.: Application of digital-image correlation techniques to experimental mechanics, *Experimental Mechanics*, no. 25, 1985, pp. 232-244.
- [5] Peters W. H., Ranson W. F., Sutton M. A., et al: Applications of digital image correlation methods to rigid body mechanics, *Optical Engineering*, no. 22, 1983, pp. 738-742.
- [6] Peters W. H., Ranson W. F.: Digital imaging technique in experimental stress analysis, *Optical Engineering*, no. 21, 1982, pp. 427-431.
- [7] Uhl T., Kohut P., Holak K.: Diagnozowanie konstrukcji z zastosowaniem korelacji obrazu, *Diagnostyka*, nr 3(43), 2007, s. 15-24.
- [8] Szymczak T., Kowalewski Z. L., Brodecki A.: Metoda cyfrowej korelacji obrazu w badaniach materiałów i elementów, *Dozór Techniczny*, z. 4, 2016, s. 22-31.
- [9] Hagara M., Huňady R., Lengvarký P., Bocko J.: Numerical Verification of a Full-field Deformation Analysis of a Specimen Loaded by Combined Loading, *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 7, 2014, pp. 307-311.
- [10] Frankovský P., Virgala I., Hudák P., Kostka J.: The use of the digital image correlation in a strain analysis, *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, vol. 18, no. 4, 2013, pp. 1283-1292.
- [11] Trebuňa F., Huňady R., Bobovský Z., Hagara M.: Results and Experiences from the Application of Digital Image Correlation in Operational Modal Analysis, *Acta Polytechnica Hungarica*, 2013, vol. 10, no. 5, pp. 159-174.
- [12] Instrukcja obsługi systemu Q-450: Q-450 SYSTEM Operation Manual, Dantec Dynamics, 2013.
- [13] <http://www.dantecdynamics.com/digital-image-correlation> (dostęp: 30.09.2016 r.).
- [14] Turoń B., Ziaja D., Miller B.: Wykrywanie uszkodzeń węzłów ramy stalowej z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture, JCEEA*, tom XXXIV, z. 64 (2/II/17), kwiecień-czerwiec 2017, s. 185-198, DOI:10.7862/rb.2017.91.
- [15] Szymczak T., Grzywna P., Kowalewski Z. L.: Nowoczesne metody określania wytrzymałościowych właściwości materiałów konstrukcyjnych, *Transport Samochodowy*, z. 1, 2013, s. 79-104.
- [16] Lord J. D.: Digital Image Correlation (DIC), *Modern Stress and Strain Analysis. A state of the art guide to measurement techniques*. BSSM Technical Editors: J. Eaton Evans, J. M. Dulieu-Barton, R. L. Burguete, 2009, s. 14-15.
- [17] Kowalewski Z. L., Szymczak T.: Podstawy tensometrii elektrooporowej oraz praktyczne jej zastosowania, *Dziewiętnaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów*, Zakopane, 12-15 marca, 1, s. 69-91, 2013.
- [18] Błyskal E., Ślęczka L.: Badania doświadczalne rozciąganych kątowników łączonych za pomocą jednej śruby, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*

- Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture, JCEEA, tom XXXIII, z. 63 (1/I/16), styczeń-marzec 2016, s. 323-330, DOI:10.7862/rb.2016.38.
- [19]D. Kukła, A. Kozłowski: Badania doświadczalne spawanych połączeń kątowników nierównoramiennych z blachą węzłową, Inżynieria i Budownictwo, nr 10, 2016, s. 543-547.

## **REGISTRATION AND ANALYSIS OF THE DISPLACEMENTS AND STRAINS FIELDS WITH THE USE OF THE DIGITAL IMAGE CORRELATION SYSTEM 3D**

### **S u m m a r y**

In recent years, as an alternative to traditional methods of displacements and strains measurements, non-contact methods based on opto-electronic systems have been developed. One of them is the digital image correlation (DIC) system which allows for the registration and analysis of the displacements and strains fields on the surface of the investigated object in three-dimensional space. The paper presents 3D DIC on the example of the Q-450 system from Dantec Dynamics and its application in the study of steel structure elements connections, discusses the principle of its operation and test stages. In addition, the paper describes the applicability of the system, its advantages and limitations. A wide analysis of displacements and strains fields with the use of various tools available in the Q-450 software Istra 4D allows detailed description of the investigated object deformation and the phenomena occurring when the object is loaded. Information presented herein may be useful for future system users and contribute to wider usage of non-contact methods in displacements and strains measurements.

**Keywords:** digital image correlation (DIC), vision methods, non-contact measurement, displacement and strain measurements

*Przesłano do redakcji: 11.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Bogusław SZUBA<sup>1</sup>

## INNOWACYJNE KSZTAŁTOWANIE OBIEKTÓW ENERGOOSZCZĘDNYCH NA PRZYKŁADZIE PRZEBUDOWY BYŁEGO OBIEKTU WOJSKOWEGO NA CENTRUM SZKOLENIOWO KONFERENCYJNE W PRUDNIKU

Autor podejmuje tematykę związaną ze współczesnym trendem realizacji obiektów energooszczędnych. Obserwuje się upraszczanie tego zagadnienia do bezkrytycznego wprowadzania urządzeń technicznych, które same w sobie nie są niczym złym, jednak ich zastosowanie w wielu wypadkach nie posiada racjonalnego uzasadnienia, co więcej podejmowane są próby ich propagowania bez uwzględniania lokalnych uwarunkowań środowiskowych. Przedmiotem treści artykułu są zagadnienia związane z termoizolacyjnością budynku, wymianą powietrza z odzyskiem ciepła, pozyskaniem słonecznej energii cieplnej, wykorzystaniem ciepła odpadowego z klimatyzacji, a także akumulacją ciepła, przy jednoczesnym minimalizowaniu zastosowania urządzeń technicznych, a także uwzględnieniu wymagań konserwatorskich, odnoszących się do przedmiotowego obiektu.

**Słowa kluczowe:** budynki energooszczędne, energia, problemy projektowe, technologie budowlane, uwarunkowania środowiskowe

### 1. Wprowadzenie

Istnieje potrzeba wiązania struktury funkcjonalno-przestrzennej, konstrukcji, rozwiązań materiałowych oraz formy obiektu architektonicznego w sposób zapewniający niską energochłonność obiektu wraz z możliwie pełnym powiązaniem z otaczającym środowiskiem. Interesujące przykłady tego typu budynków oraz rozwinięcia tej problematyki przedstawiają między innymi: Leszek Laskowski [1], Tadeusz Sumień [2], Paulina Gawrońska [3], Mirosława Górecka [4, 5], Kisielewicz [6].

Budynek położony w Prudniku przy ul. Legionów 1 poza funkcją szkoleniowo-konferencyjną będzie pełnił także rolę „laboratorium”. Kompilacja wprowadzonych rozwiązań architektoniczno-konstrukcyjnych oraz technicznych

---

<sup>1</sup> Bogusław Szuba, Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, e-mail: boguslaw.szuba@wst.com.pl

będzie przedmiotem przyszłych obserwacji i ukierunkowanych badań naukowych w trakcie użytkowania obiektu.

Przedstawione rozważania mają na celu zwrócenie uwagi na potrzebę indywidualnego poszukiwania rozwiązań obiektów energooszczędnych w pełni zintegrowanych z lokalnymi uwarunkowaniami środowiska przyrodniczego, społeczno-kulturowego i zbudowanego przez człowieka.

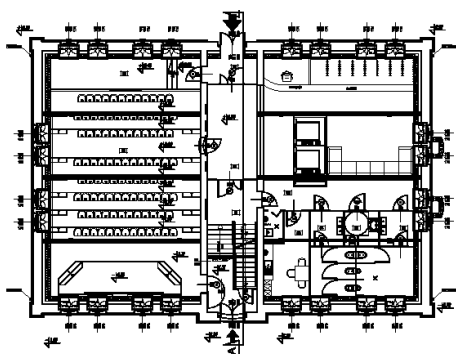
## 2. Uwarunkowania lokalne

### 2.1. Lokalizacja obiektu

Budynek usytuowany jest na skraju kompleksu byłych obiektów wojskowych w rejonie ul. Legionów w Prudniku. Trzy elewacje budynku posiadają dobre usłonecznienie od strony zachodnio-północnej, południowo-zachodniej i południowo-wschodniej. Wysoka zieleń towarzysząca zabudowie nieco osłabia bezpośredni dostęp promieni słonecznych, jednak z racji iż są to drzewa liściaste w lecie budynek będzie nieco chroniony przed przegrzaniem, w natomiast zimą (po opadnięciu liści) będzie wystawiony na silniejszą ekspozycję promieni słonecznych.

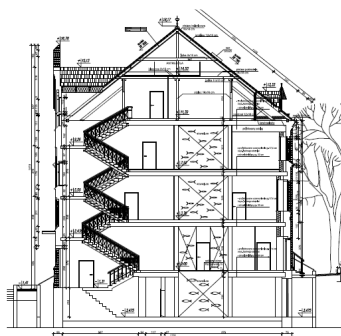
### 2.2. Uwarunkowania programowe podstawowe

Autor stanął przed zadaniem wprowadzenia do obiektu następujących funkcji: sala konferencyjna dla ok. 100 osób z możliwością organizacji funkcji kina, sale dla prowadzenia paneli konferencyjnych dla 50 osób każda, sala biesiadna dla ok. 100 osób, zaplecze dla cateringu, rekreacja, sala wypoczynkowa z kawiarnią, pomieszczenia administracyjne i sale spotkań o charakterze kameralnym, zaplecze szatniowo-sanitarne, zaplecze techniczno-gospodarcze (rys.1-2).



Rys. 1. Parter – projekt (oprac. autora)

Fig. 1. Ground floor – project (work out by author)

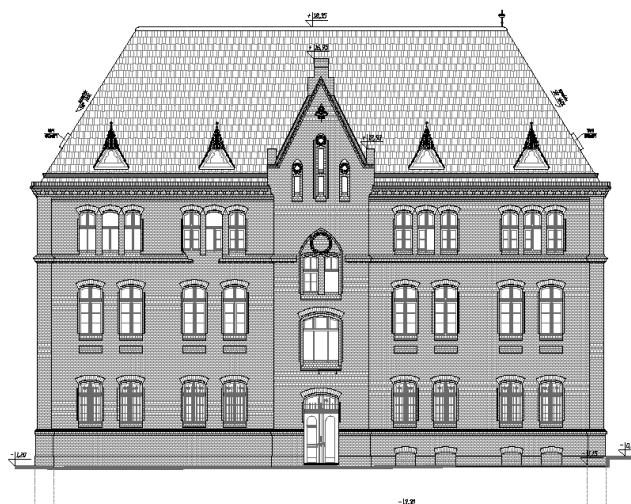


Rys. 2. Przekrój – projekt (oprac. autora)

Fig. 2. Cross section (work out by author)

### 2.3. Uwarunkowania konserwatorskie

Wymagania konserwatorskie sprowadzają się do maksymalnego zachowania elewacji, wymiany stolarki na nową jednak przy zachowaniu podziałów okiennych, uzupełnienia cegły licówki (rys.3).



Rys. 3. Elewacja od strony ulicy (oprac. na podstawie M. Dyc)

Fig. 3. Elevation from the side of the street (work out by M. Dyc)

## 3. Rozwiązania techniczne

### 3.1. Izolacja termiczna budynku

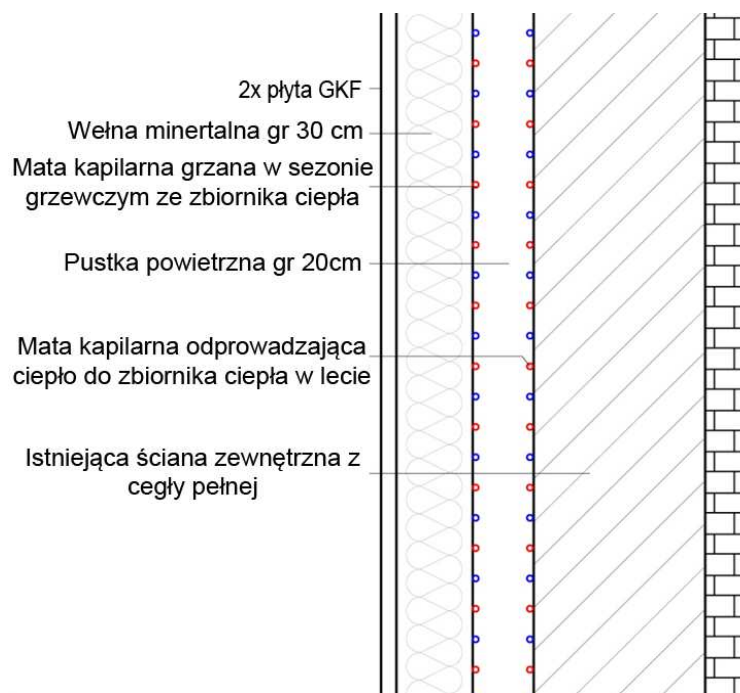
Wprowadzanie ocieplenia od wewnętrznej strony przegrody wiąże się z ryzykiem wykroplenia pary wodnej, co znacznie obniża wartość termiczną ściany a także przyczynia się do jej destrukcji. Zaprojektowano warstwę ocieplenia z wełny mineralnej o grubości 30cm, zamocowaną na podkonstrukcji z profili wykorzystywanych do ścian rygipsowych, odsuniętą od zewnętrznej ściany o 20cm. Wytworzona pustka jest bardzo obszerna, tworzy nie tyle przestrzeń wentylacji przegrody co raczej strefę buforową.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Zwykle przestrzeń strefy buforowej kojarzona jest przez architektów z ogrodami zimowymi, oszklonymi werandami i zabudowanymi loggiami. Tego typu elementy budynków łatwiej jest stworzyć w obiektach nowoprojektowanych bądź nie objętych ochroną konserwatorską. Idea stosowania przeszklonych przestrzeni buforowych bardzo dobrze wpisuje się w nurt projektowania ekologicznego i jest współcześnie szeroko rozwijana. Wiele interesujących przykładów rozwiązań tej przestrzeni podaje między innymi Tadeusz Sumień [2], Paulina Gawrońska [3]. W omawianym przez autora przypadku wytworzenie strefy buforowej ma miejsce w strukturze konstrukcyjno-materiałowej obiektu, co zasadniczo odbiega od powszechnie stosowanych stref buforowych.

Strefa ta w ma spełniać ważną funkcję obniżania różnicy temperatur – pomiędzy strefą pomieszczeń ogrzewanych a powietrznym buforem, następnie pomiędzy buforem a otoczeniem zewnętrznym budynku. Tego typu stopniowanie ma doprowadzić do zmniejszenia strat ciepłych budynku.

W przestrzeni pustki bufora powietrznego przewiduje się wprowadzenie dwóch mat kapilarnych wspomagających pracę przegrody termoizolacyjnej (rys.4).

- Jedna z nich będzie zamocowana bezpośrednio na wewnętrznej powierzchni ściany zewnętrznej. Będzie ona zlokalizowana tylko na ścianach nasłonecznionych, które w czasie lata skutkiem promieniowania słonecznego będą się nagrzewać. Zadaniem mat kapilarnych będzie odbieranie gromadzonego w ścianach ciepła oraz przekazywanie go do mającego znaleźć się w podpiwniczeniu zbiornika ciepła.
- Druga z nich będzie zamocowana po przeciwległej stronie bufora powietrznego, bezpośrednio na powierzchni warstwy nowo projektowanej warstwy ocieplenia. Ta mata będzie miała za zadanie dodatkowo zmniejszać różnicę temperatur pomiędzy strefą pomieszczeń ogrzewanych a wewnętrzną powierzchnią warstwy ocieplenia. Mata będzie zasilana w okresie jesienno-zimowym ze zbiornika ciepła.



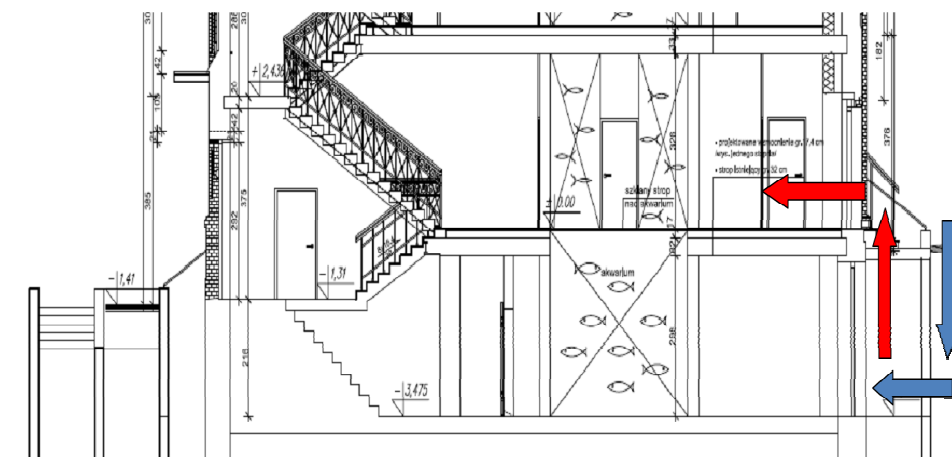
Rys. 4. Przekrój przez przegrodę zewnętrzną – projekt (oprac. autora)

Fig. 4. Cross section through outside wall – project (work out by author)

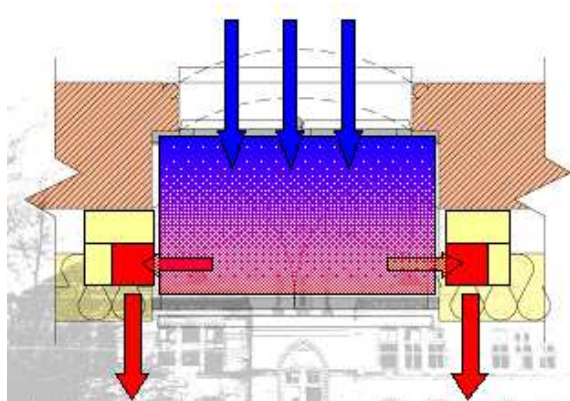
### 3.2. Wymiana powietrza z odzyskiem ciepła

Obiekt musi spełniać podstawowe kryteria wymiany powietrza przeznaczonego dla jego użytkowników. Zaprojektowano dwa rodzaje wentylacji (rys.5-7).

- Pierwszy z nich polega na bezpośredniej wymianie powietrza drogą przewietrzania. Wszystkie przewidywane funkcje jakie ma spełniać obiekt, starano się zrealizować w pomieszczeniach posiadających okna zewnętrzne.
- Drugi sposób wentylacji jest bardziej złożony. Powietrze zużyte będzie prowadzone wydzielonymi kanałami grawitacyjnymi, których lokalizację przewidziano w opisanej powyżej strefie buforowej ścian zewnętrznych (uniknięcie niedogodności z ich lokalizowaniem we wnętrzu pomieszczeń użytkowych oraz wykorzystanie ciepła odlotowego). Powietrze świeże będzie wstępnie ogrzewane przez wymiennik gruntowy, następnie przez tunel słoneczny znajdujący się w przestrzeni piwnic, dalej w wydzielonych przestrzeniach okien skrzynkowych (które mają za zadanie pobierać ciepło z promieniowania słonecznego i przekazywać je do świeżego powietrza wprowadzanego do budynku).

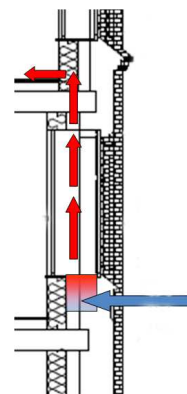


Rys. 5. Fragment przekroju – ogrzewanie powietrza nawiewnego przez tunel słoneczny (oprac. autora)  
Fig. 5. Part of the cross section – hitting of the air blowing through the sun tunnel (work out by author)



Rys. 6. Okno skrzynkowe jako kolektor słoneczny ogrzewający powietrze nawiewne (oprac. autora)

Fig. 6. Box window as the sun collector hitting the air blowing (worked out by author)



Rys. 7. Przekrój przez okno skrzynkowe pracujące jako kolektor słoneczny (oprac. autora)

Fig. 7. Cross section by the box window working as the sun collector (worked out by author)

### 3.3. Sposoby pozyskiwania słonecznej energii cieplnej

Projekt przewiduje pozyskiwanie energii słonecznej za pomocą różnych rozwiązań:

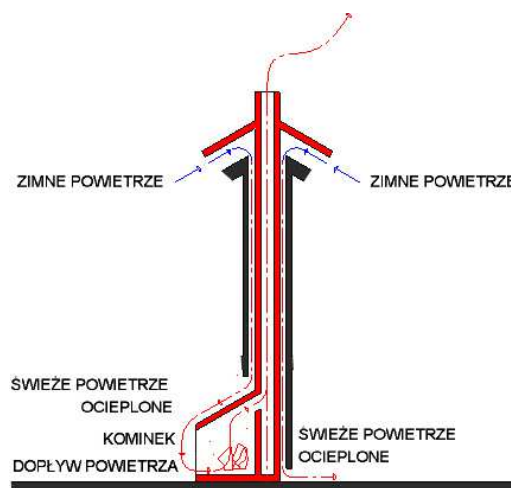
- za pomocą instalacji przewidzianej bezpośrednio pod ciemną, grafitową dachówką,
- z przegród zewnętrznych (w okresie lata) za pomocą mat kapilarnych usytuowanych po wewnętrznej stronie przegrody,
- za pomocą okien skrzynkowych wyposażonych w komory pobierające ciepło, ciemne aluminiowe żaluzje oraz parapety i ościeżnice pokryte ciemnym gremsem mają wspomagać efekt pozyskiwania ciepła.
- za pomocą tunelu słonecznego usytuowanego w poziomie piwnic, który poza pozyskiwaniem ciepła słonecznego ma za zadanie tworzyć strefę buforową dla zbiornika ciepła zlokalizowanego w poziomie piwnic, co ma ograniczać straty ciepła z jego wnętrza.
- z rozgrzanych w lecie posadzek otoczenia zewnętrznego budynku (parkingu i chodników).

### 3.4. Wykorzystanie ciepła odpadowego

Przewiduje się wprowadzenie klimatyzacji, ciepło odpadowe nie będzie kierowane na zewnątrz obiektu, lecz do akumulatora ciepła znajdującego się w piwnicy. W zapleczach kuchennych będą zainstalowane urządzenia schładzające temperaturę tych pomieszczeń. Odebrane ciepło będzie wykorzystane do



przygotowania ciepłej wody użytkowej wykorzystywanej do zmywania naczyń. Inwestor rozważa również wykorzystanie ciepła ze ścieków. Planuje się wprowadzenie przelotowego dwupłaszczowego zbiornika jako elementu pozyskującego ciepło ze ścieków sanitarnych. Płaszcz zewnętrzny będzie wypełniał czynnik odbierający ciepło. Poprzez komorę wewnętrzną będą przepływać ścieki prowadzone ostatecznie do kanalizacji sanitarnej. Na poddaszu przewidziano kominek. Poza ozdobą wnętrza będzie również dodatkowym źródłem energii cieplnej. Z racji nagrzewania się trzonu kominowego ciepło będzie przekazywane do wnętrza obiektu. Ponieważ proces palenia wywołuje zjawisko zasysania powietrza z wnętrza pomieszczenia, planuje się wprowadzenie w przedmiotowym kominie kilku otworów nawiewnych, które będą zasilaty kondygnację kawiaręki w świeże i ogrzane przez trzon kominowy powietrze. Powietrze to będzie kierowane do sali, na przeciwną stronę kominka, i dalej poprzez salę w stronę paleniska kominka by powrócić do atmosfery poprzez znajdujący się w kominie trzon dymowy (rys.8).<sup>3</sup>



Rys. 8. Komin jako rekuperator ciepła (oprac. autora na podstawie [2])

Fig. 8. The chimney as the air recuperator of the warmth (worked out by author on the base [2])

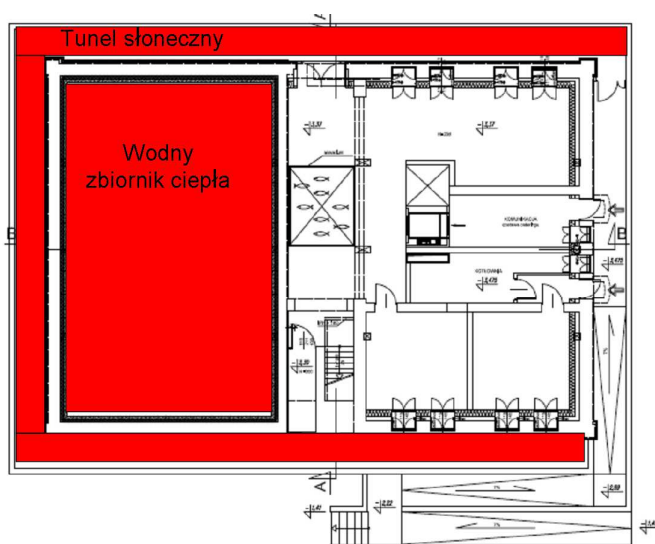
### 3.5. Akumulacja ciepła

Wiele rozwiązań składowania ciepła podaje Tadeusz Sumień [2, s. 61-63]. Różne próby podejmowania realizacji zbiorników ciepła dokonywane są przez inwe-

<sup>3</sup> Podobne rozwiązanie, związane z odzyskiem ciepła powstającego w wyniku spalania w kominie, autor wprowadził w realizowanym obecnie budynku jednorodzinny w Koninku pod Poznaniem. Szerzej na ten temat traktuje artykuł autora *Naturalna wentylacja grawitacyjno nawiewna z pasywnym odzyskiem ciepła*, [w]: Przegląd Budowlany nr 5, s. 49-54, maj 2013 [7].

storów indywidualnych.<sup>4</sup> Doświadczalny system grzewczy kolektorów słonecznych i gruntowego akumulatora energii cieplnej opisuje firma Solis.<sup>5</sup> Akumulator ciepła zastosowany na skalę przemysłową (30400m<sup>3</sup>) został zrealizowany w Elektrociepłowni Siekierki.<sup>6</sup> [11]

Na potrzebę akumulacji ciepła przewidziano wprowadzenie do kondygnacji piwnic zbiornika ciepła (rys.9). Zaprojektowano zbiornik wodny o pojemności 500m<sup>3</sup>. Straty ciepła będą ograniczone przez płaszcz izolacji termicznej wykonanej po wewnętrznej stronie przegrody zewnętrznej piwnic. Ponieważ ściany zewnętrzne sąsiadują z tunelem słonecznym ucieczka ciepła ze zbiornika będzie minimalna. Medium grzejnym zbiornika jak też odbierającym z niego ciepło jest glikol prowadzony w instalacjach przystosowanych do tego celu mat kapilarnych oraz specjalnie do tego celu przeznaczonych rur.



Rys. 9. Piwnice – projekt (oprac. autora)

Fig. 9. Basement – project (worked out author)

Ciepło prowadzone do akumulatora będzie pozyskiwane z kolektorów cieczowych umieszczonych pod ciemną dachówką, pod nawierzchniami chodników i dróg w pobliżu budynku oraz na powierzchni wewnętrznej ścian zewnętrznych. Ponadto będzie akumulowane ciepło odpadowe z klimatyzacji.

<sup>4</sup> Budowę akumulatorów ciepła podejmuje między innymi Pan Jacek Sternowski, właściciel firmy budowlanej "e-domek.com" ([http://ladnydom.pl/budowa/1,106577,5497537,Nowy\\_sposob\\_na\\_ciepła\\_wode\\_\\_\\_ciepło\\_pod\\_podloga.html](http://ladnydom.pl/budowa/1,106577,5497537,Nowy_sposob_na_ciepła_wode___ciepło_pod_podloga.html)) (dostęp 15/07.2016) [8].

<sup>5</sup> <http://www.sator.solis.pl> (dostęp 15/07.2016) [9].

<sup>6</sup> Na podstawie informacji zawartej pod adresem [http://www.igeos.pl/doc/File/2008/10/\\_akumulatory/materialy/JAworski.pdf](http://www.igeos.pl/doc/File/2008/10/_akumulatory/materialy/JAworski.pdf) (dostęp 15/07.2014) [10, 11].

### 3.6. Minimalizowanie zastosowania urządzeń technicznych

Intencją autora projektu jest ograniczenie stosowania urządzeń technicznych do minimum przy priorytecie wprowadzania rozwiązań architektoniczno-konstrukcyjnych współuczestniczących w procesach pozyskiwania, akumulowania i wykorzystywania ciepła (zarówno słonecznego jak i odpadowego). Nie oznacza to całkowitą likwidację urządzeń technicznych, natomiast wskazuje na ich wspomagające wykorzystanie.

## 4. Wnioski

Wobec miejscowych uwarunkowań, wyrażających się specyfiką lokalnych potrzeb użytkownika, określonych możliwości wykorzystania warunków naturalnych oraz ograniczeniami związanymi z miejscową tradycją, wskazaniem konserwatorskimi, urbanistycznymi i architektonicznymi - kryterium budynku energooszczędnego w pierwszej kolejności powinno brać pod uwagę priorytet energooszczędnych rozwiązań architektoniczno-konstrukcyjnych, w drugiej wprowadzanie wspomagających w tym zakresie urządzeń technicznych.

## Literatura

- [1] Laskowski L. Bierne wykorzystanie energii słonecznej do ogrzewania [w:] Praca zbiorowa: Budynki i ich elementy przystosowane do uzysku i akumulacji energii cieplnej ze źródeł odnawialnych promieniowania słonecznego i ciepła powierzchniowych warstw gruntu. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN. Warszawa 1990.
- [2] Sumień T., Wegner-Sumień A.: Ekologiczne, miasta, osiedla, budynki, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Seria wydawnictw CPBR, s. 60-63, Warszawa 1991.
- [3] Gawrońska P.: O oszklonej przestrzeni buforowej, Świat Szkła, Euro-Media Sp. z o.o., zeszyt 6. Warszawa 2008.
- [4] Górecka M.: Nurt tradycyjny w architekturze domu niskoenergochłonnego, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, zeszyt 57, Politechnika Białostocka, Białystok s. 189-196, 2010.
- [5] Górecka M.: Główne zalecenia w projektowaniu niskoenergetycznych domów wiejskich Architectura 11 (2) 2012, 35-42 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie .
- [6] Kisielewicz T.: O konieczności architektoniczno-energetycznego projektowania budynków. IV Międzynarodowa konferencja nt. „Problemy projektowe w kontekście nowych technologii budowlanych” Politechnika Krakowska, Kraków 2005.
- [7] Szuba B.: Naturalna wentylacja grawitacyjno nawiewna z pasywnym odzyskiem ciepła, [w]: Przegląd Budowlany nr 5, s. 49-54, Warszawa 2013.
- [8] [http://ladnydom.pl/budowa/1,106577,5497537,Nowy\\_sposob\\_na\\_cieplo\\_wode\\_\\_\\_cieplo\\_pod\\_podloga.html](http://ladnydom.pl/budowa/1,106577,5497537,Nowy_sposob_na_cieplo_wode___cieplo_pod_podloga.html) {dostęp 15.07.2016}.
- [9] <http://www.sator.solis.pl> {dostęp 15.07.2016}.
- [10] <http://www.igeos.pl> {dostęp 15.07.2016}.

- [11] Jaworski A.: Poland Studium Akumulator ciepła w Vattenfall Heat przypadku, Departament Inwestycji Ec Siekierki Vattenfall Head Poland S.A., Warszawa 2008.

## **INNOVATING SHAPING ENERGY-EFFICIENT OBJECTS ON THE EXAMPLE OF THE FORMER MILITARY BUILDING CONVERTED INTO THE CONFERENCE AND TRAINING CENTRE IN PRUDNIK**

### **S u m m a r y**

The author is taking the subject matter associated with the contemporary trend of the realization of energy-efficient buildings. It is being observed the simplifying this issue for uncritical implementing of technical devices, which alone in themselves are nothing bad, but their applying don't have rational ground in many cases, what's more there are lot of attempts of propagate them without taking local environmental conditionings into account. The subject of the article are issues connected with thermo-isolation, the exchange of air with recycling of the warmth, acquiring the solar thermal energy, exploiting the scrap warmth from the air-conditioning, as well as the accumulation of the warmth, with simultaneous minimizing applying technical devices, as well as considering referring to the object conservator's requirements.

The aspiration of creating energy self-sufficiency objects should be carried out by implementing architectural-building solutions, assisted with applying technical devices. Turning the order away in search for energy-efficient solutions can lead to second-rate treating the subject of creating space and significant architectural values.

**Keywords:** energy-efficient buildings, energy, building technologies, design problems, environmental conditionings

*Przesłano do redakcji 15.07.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Anna MŁYŃSKA<sup>1</sup>  
Krzysztof CHMIEŁOWSKI<sup>2</sup>  
Dariusz MŁYŃSKI<sup>3</sup>

## REDUKCJA ZWIĄZKÓW BIOGENNYCH NA WYBRANYCH OCZYSZCZALNIACH ŚCIEKÓW WOJEWÓDZTWA PODKARPACKIEGO Z UWZGLĘDNIENIEM WARUNKÓW POGODY SUCHEJ I MOKREJ

W artykule dokonano analizy stopnia redukcji azotu ogólnego i fosforu ogólnego osiągniętego w 2015 roku na dwóch wybranych oczyszczalniach województwa podkarpackiego. Jak się okazuje, zachodzące w nich procesy biologicznego oczyszczania ścieków zapewniły wysoki poziom redukcji związków biogenych. Zauważono, że na skuteczność zmniejszania koncentracji związków azotu i fosforu nie wpłynęły warunki pogodowe związane z występowaniem bądź niewystępowaniem opadów atmosferycznych. Istnieje bowiem zagrożenie, że nadmierne ilości wód opadowych w systemach kanalizacyjnych powodują zmniejszenie ilości materii organicznej podatnej na biodegradację na skutek rozcieńczenia ścieków i w konsekwencji obniżenie skuteczności usuwania zanieczyszczeń.

**Słowa kluczowe:** ścieki, oczyszczalnia, redukcja, azot ogólny, fosfor ogólny, pogoda bezdeszczowa, pogoda deszczowa

### 1. Wprowadzenie

Zaostrzenie prawnych regulacji dotyczących maksymalnych ilości związków azotu i fosforu, które mogą zostać odprowadzone do środowiska naturalnego wraz ze ściekami oczyszczonymi wymusiło na wielu eksploatacjach oczyszczalni przeprowadzenie prac modernizacyjnych, głównie pod kątem osiągnięcia jak największej skuteczności eliminacji związków biogenych. Przed laty, część

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Anna Młyńska, Politechnika Krakowska, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; a.mlynska13@gmail.com

<sup>2</sup> Krzysztof Chmielowski, Uniwersytet Rolniczy, Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; k.chmielowski@ur.krakow.pl

<sup>3</sup> Dariusz Młyński, Uniwersytet Rolniczy, Katedra Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; dariusz.mlynski@gmail.com

funkcjonujących obiektów w ogóle nie była przystosowana do usuwania biogenów bądź była przystosowana lecz w niewystarczającym stopniu, o czym świadczą wciąż wysokie ich stężenia w ściekach odpływających z oczyszczalni, co z kolei skutkowało intensyfikacją procesów eutrofizacji w naturalnych zbiornikach wodnych.

Właściwa skuteczność procesów usuwania związków azotu na drodze nityfikacji i denitryfikacji oraz usuwania związków fosforu osiągnięta zostanie, jeśli w poszczególnych obiektach technologicznych oczyszczalni stworzone zostaną właściwe warunki, związane głównie z zapewnieniem dostatecznej zawartości materii organicznej podatnej na biodegradację oraz odpowiedniej ilości tlenu, wartości temperatury czy zakresu pH ścieków [1]. Jedynie w sytuacji, gdy biologiczna defosfatacja ścieków nie przynosi zadowalających efektów, procesy biologiczne zastępuje się bądź wspomaga się głównie procesami strącania chemicznego i koagulacji [2].

Oddziałujące w nadmiarze na systemy kanalizacji ogólnospławnej wody opadowe wpływają negatywnie nie tylko na kanały ściekowe i obiekty sieciowe, ale także na pracę oczyszczalni [3]. Kanalizowanie obszarów systemem kanalizacji rozdzielczej pomaga uniknąć tego typu sytuacji, jednak problem pojawia się wówczas, gdy na kanały sanitarne systemu rozdzielczego oddziałują wody przypadkowe. Źródeł dopływających wód przypadkowych jest wiele, aczkolwiek najczęściej upatruje się ich w postaci wód opadowych lub roztopowych przedostających się do kanalizacji przez otwory i szczeliny we włazach studzienek bądź przez nielegalne podłączanie rynien dachowych i wpustów podwórzowych do kanałów ściekowych [4, 5, 6, 7, 8].

Nadmierne oddziaływane wód opadowych, czy to na systemy kanalizacji ogólnospławnej, czy na systemy kanalizacji rozdzielczej prowadzi często do zakłóceń pracy oczyszczalni. Ścieki sanitarne, które pozostają pod znacznym wpływem ścieków opadowych, charakteryzują się zmienionym składem, zwiększonym natlenieniem i rozcieńczeniem, a zbyt duża ilość dopływających ścieków powoduje przeciążenie hydrauliczne poszczególnych urządzeń ciągu technologicznego oczyszczalni, co zakłóca właściwy proces przebiegu usuwania związków biogenych [9, 10]. Wody przypadkowe pochodzące z topniejącego śniegu lub opadów deszczu powodują wychładzanie się ścieków, co wpływa negatywnie na skuteczność procesów biologicznego oczyszczania, które najefektywniej zachodzą w warunkach temperatury na poziomie około 20°C [11, 12]. Co więcej, rozcieńczone wodami opadowymi ścieki charakteryzują się zmniejszonymi wartościami BZT<sub>5</sub>, hamując procesy denitryfikacji, a także obniżonymi wartościami ChZT i zawiesiny ogólnej [13]. Z badań przeprowadzonych przez Kaczora [14] wynika natomiast, że im większy udział wód przypadkowych w trakcie pogody mokrej, tym także mniejsze jest stężenie azotu ogólnego i fosforu ogólnego w ściekach surowych, jako skutek ich rozcieńczenia.

W artykule przeanalizowano w jakim stopniu obecny w ściekach azot ogólny i fosfor ogólny redukowany był w 2015 roku na dwóch wybranych oczysz-

czalniach zlokalizowanych na terenie województwa podkarpackiego. Dodatkowo uwzględniono warunki pogody bezdeszczowej i deszczowej celem weryfikacji, czy w okresach trwania pogody mokrej wody opadowe oddziałujące na systemy sanockiej i przemyskiej kanalizacji wpłynęły na poziom redukcji związków azotu i fosforu.

## 2. Opis obiektów badań

### 2.1. Oczyszczalnia ścieków w Trepczy

Oczyszczalnia w Trepczy (RLM 75 920) unieszkodliwia ścieki komunalne i przemysłowe dopływające częściowo ogólnospławnym systemem kanalizacji z obszaru sanockiej aglomeracji, obejmującej gminę wiejską oraz miasto Sanok. Jest to oczyszczalnia mechaniczno-biologiczna, w której procesy mechanicznego oddzielenia części stałych zanieczyszczeń zachodzą kolejno na trzech kratkach gęstych, następnie w dwóch piaskownikach oraz w dwóch osadnikach wstępnych poziomych podłużnych. Część biologiczną obiektu stanowią dwa niezależnie funkcjonujące reaktory przepływowe z wydzielonymi komorami predenitryfikacji, defosfatacji, denitryfikacji i nitryfikacji oraz trzy osadniki wtórne radialne, z których oczyszczone ścieki kierowane są do rzeki San. Przepustowość hydrauliczna obiektu określona została na poziomie 15 000 m<sup>3</sup>/d, natomiast maksymalna ilość ścieków, którą jest w stanie przyjąć oczyszczalnia w trakcie trwania opadów wynosi 28 000 m<sup>3</sup>/d [15, 16, 17].

### 2.2. Oczyszczalnia ścieków w Przemyśle

Drugi obiekt badań znajdujący się na terenie miasta Przemyśl, charakteryzuje się RLM na poziomie 101 833 i ma za zadanie oczyszczanie ścieków komunalnych i przemysłowych doprowadzanych głównie kolektorami kanalizacji ogólnospławnej z obszaru miasta i gminy wiejskiej Przemyśl oraz z gminy Krasiczyn. Oczyszczalnię w Przemyśle zwymiarowano na przepływ średni dobowy równy 28 200 m<sup>3</sup>/d oraz przepływ maksymalny dobowy na poziomie 45 200 m<sup>3</sup>/d. Na przemyskiej oczyszczalni realizowane są procesy mechaniczno-biologicznego unieszkodliwiania ścieków, po których to oczyszczone ścieki odprowadzane są bezpośrednio do rzeki San [17]. W skład ciągu technologicznego obiektu wchodzi następujące elementy [18]:

- w części mechanicznej: trzy kratki gęste, dwa piaskowniki poziome oraz dziesięć osadników wstępnych poziomych podłużnych,
- w części biologicznej: cztery komory osadu czynnego z wydzielonymi strefami defosfatacji, denitryfikacji, nitryfikacji i dwiema strefami buforowymi oraz sześć osadników wtórnych radialnych.

### 3. Materiały i metody badawcze

Dane wyjściowe i materiały, którymi posłużono się w niniejszym opracowaniu obejmują następujące elementy:

- 1) Odnotowane w 2015 roku wyniki pomiarów parametrów fizykochemicznych 24 próbek ścieków surowych i oczyszczonych, obejmujące swym zakresem stężenia azotu ogólnego ( $N_{og.}$ ) i fosforu ogólnego ( $P_{og.}$ ).
- 2) Dobowe wielkości ilości ścieków dopływających do oczyszczalni w Trepczy i do oczyszczalni w Przemysłu zarejestrowane w 2015 roku.
- 3) Dane dotyczące wysokości opadów atmosferycznych odnotowanych na terenie zlewni danej oczyszczalni w poszczególnych dniach 2015 roku;
  - oczyszczalnia ścieków w Trepczy: dane opadowe zarejestrowane na stacji hydrologiczno-meteorologicznej w Lesku;
  - oczyszczalnia ścieków w Przemysłu: dane opadowe zarejestrowane na automatycznej stacji synoptycznej w Przemysłu.
- 4) Rozporządzenie Ministra Środowiska (Dz.U. 2014 poz. 1800) [19].

Na podstawie odnotowanych wielkości stężeń azotu ogólnego ( $N_{og.}$ ) i fosforu ogólnego ( $P_{og.}$ ) w ściekach surowych i oczyszczonych wyznaczono podstawowe statystyki opisowe, obejmujące wartości minimalne, maksymalne oraz średnie, które porównano z ich wymaganymi wartościami regulowanymi przez obowiązujące Rozporządzenie [19] (tabela 1).

Tabela 1. Dopuszczalne wartości stężenia azotu ogólnego ( $N_{og.}$ ) i fosforu ogólnego ( $P_{og.}$ ) lub ich minimalny procent redukcji w ściekach odprowadzanych do środowiska naturalnego [19]

Table 1. Allowable total nitrogen ( $N_{tot.}$ ) and total phosphorus ( $P_{tot.}$ ) concentration values or its minimum percentage reduction in sewage discharged to the environment [19]

Nazwa wskaźnika	Parametr	Jednostka	Oczyszczalnia ścieków w Trepczy (RLM 75 920)	Oczyszczalnia ścieków w Przemysłu (RLM 101 833)
azot ogólny ( $N_{og.}$ )	stężenie	mg/dm <sup>3</sup>	15	10
	redukcja	%	70-80	
fosfor ogólny ( $P_{og.}$ )	stężenie	mg/dm <sup>3</sup>	2	1
	redukcja	%	80	

Dodatkowo, na podstawie zależności wykorzystanej m.in. przez Chmielowskiego i in. [20], obliczono procentową redukcję ( $\eta$ ) analizowanych wskaźników zanieczyszczeń w okresach trwania pogody deszczowej (mokrej) oraz w okresach trwania pogody bezdeszczowej (suchej), aby zweryfikować czy na redukcję związków biogenych wpłynęły warunki pogodowe związane z występowaniem bądź niewystępowaniem opadów atmosferycznych. W tym celu, w oparciu o dane opadowe dokonano selekcji, które analizowane dni roku 2015 zaliczane były do okresów pogody suchej, a które do okresów pogody mokrej. Założono, że ścieki poddane procesom oczyszczania pozostawały pod wpływem wód opa-



dowych, jeśli w danym dniu bądź w dniu, który go poprzedzał odnotowany został opad, i którego wysokość wyniosła co najmniej 1 mm (pogoda deszczowa). Jako dni z pogodą bezdeszczową potraktowano te, w których opad nie wystąpił bądź nie przekroczył 1 mm.

Mając na uwadze fakt, że w trakcie pogody mokrej oddziałujące na system kanalizacyjny wody przypadkowe mogą powodować nadmierne rozcieńczenie ścieków surowych, co w sposób negatywny przekłada się na efekty usuwania związków biogenych, w oparciu o zarejestrowane ilości ścieków dopływających do analizowanych oczyszczalni, z uwzględnieniem podziału dni na deszczowe i bezdeszczowe oraz w oparciu o zależność (1), którymi posługiwali się także autorzy innych opracowań [8, 12], określono średni udział wód przypadkowych oddziałujących w analizowanym okresie na systemy kanalizacyjne sanockiej i przemyskiej aglomeracji.

$$UWP = \frac{Q_{dśr.} - Q_{dśr.bezd.}}{Q_{dśr.}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

gdzie:  $UWP$  – udział wód przypadkowych [%];

$Q_{dśr.}$  – średni dobowy dopływ ścieków do oczyszczalni [ $m^3/d$ ];

$Q_{dśr.bezd.}$  – średni dobowy dopływ ścieków do oczyszczalni w okresach pogody bezdeszczowej [ $m^3/d$ ].

## 4. Opracowanie i analiza wyników badań

### 4.1. Redukcja związków biogenych na oczyszczalni ścieków w Trepczy

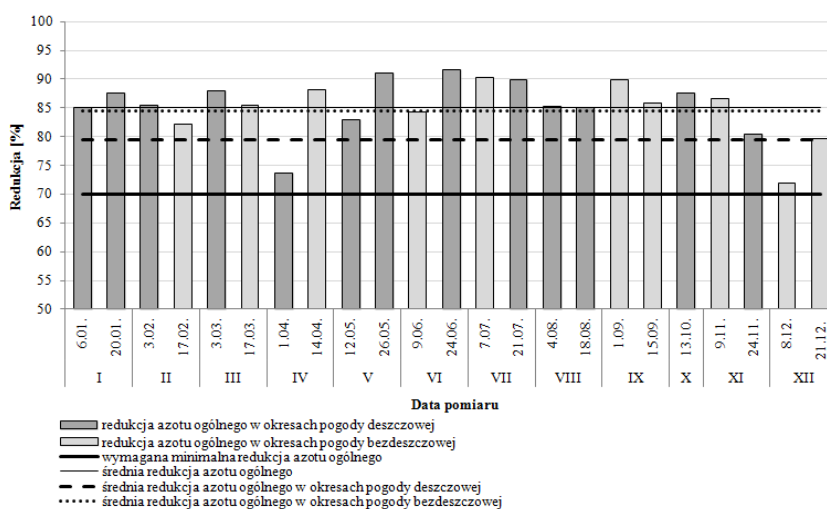
Procesy biologicznego oczyszczania zachodzące w 2015 roku na obiekcie w Trepczy zapewniały wysoki stopień redukcji azotu ogólnego ( $N_{og.}$ ) do stężeń wymaganych przez obowiązujące prawo. Stężenie tego wskaźnika w ściekach oczyszczonych zmieniało się od  $7,0 \text{ mg/dm}^3$  do  $14,6 \text{ mg/dm}^3$ , osiągając wartość średnio-roczną równą  $10,1 \text{ mg/dm}^3$ , która była o ponad 30% mniejsza od stężenia dopuszczalnego, wynoszącego  $15,0 \text{ mg/dm}^3$  (tabela 1, tabela 2).

Tabela 2. Wartości podstawowych statystyk opisowych dla stężeń azotu ogólnego ( $N_{og.}$ ) i fosforu ogólnego ( $P_{og.}$ ) w ściekach unieszkodliwianych na oczyszczalni w Trepczy w 2015 roku

Table 2. The values of the basic descriptive statistics for total nitrogen ( $N_{tot.}$ ) and total phosphorus ( $P_{tot.}$ ) concentrations in sewage treated on the Wastewater Treatment Plant in Trepcza in 2015

Nazwa wskaźnika	Jednostka	Rodzaj ścieków	Statystyka opisowa		
			Min.	Max.	Średnia
azot ogólny ( $N_{og.}$ )	$\text{mg/dm}^3$	surowe	38,7	131,5	72,9
		oczyszczone	7,0	14,6	10,1
fosfor ogólny ( $P_{og.}$ )	$\text{mg/dm}^3$	surowe	7,8	61,3	22,6
		oczyszczone	0,23	0,97	0,50

Najniższą, niespełniającą 72%-ową wartość redukcji azotu ogólnego odnotowano w dniu 8.12., który stanowił dzień bezdeszczowy. Z kolei największy stopień redukcji ( $\eta_{\max.Nog.} = 91,7\%$ ) odnotowano dnia 24.06., należącym do okresu pogody deszczowej. Dodatkowo, pomimo tego iż w 2015 roku średnia redukcja azotu ogólnego w okresach trwania pogody suchej ( $\eta_{\text{sr.Nog.bezd.}} = 84,4\%$ ) była większa od średniej redukcji azotu ogólnego w okresach trwania pogody deszczowej ( $\eta_{\text{sr.Nog.deszcz.}} = 79,5\%$ ), to jednak generalnie nie zauważa się, aby na kształowanie się tego parametru wpływały warunki pogodowe związane z występowaniem bądź niewystępowaniem opadów atmosferycznych (rys. 1).

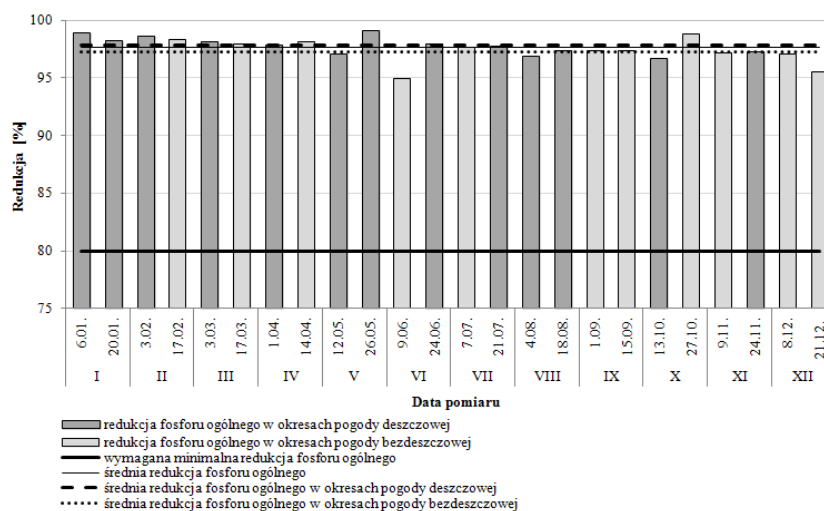


Rys. 1. Redukcja azotu ogólnego na oczyszczalni ścieków w Trepczy w 2015 roku z uwzględnieniem okresów z pogodą deszczową i bezdeszczową

Fig. 1. Total nitrogen reduction on the Wastewater Treatment Plant in Trepcza in 2015 including rainy and rainless weather periods

Średnia wielkość redukcji fosforu ogólnego ( $P_{og.}$ ) osiągnięta na oczyszczalni w Trepczy ukształtowała się na bardzo wysokim poziomie, bo równym aż 97,6%. Co więcej, w poszczególnych dniach utrzymywała się na stosunkowo wyrównanych poziomach, o czym świadczą wyznaczone wartości: minimalna ( $\eta_{\min.Pog.} = 94,9\%$ ) oraz maksymalna ( $\eta_{\max.Pog.} = 99,1\%$ ) (rys. 2). Najmniejsze stężenie fosforu ogólnego, jakie odnotowano w ściekach odprowadzanych do rzeki San wyniosło  $0,23 \text{ mg/dm}^3$ , natomiast maksymalne –  $0,97 \text{ mg/dm}^3$ , co oznacza, że każdorazowo wielkość tego parametru mieściła się w granicach określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska [19] (tabela 1, tabela 2). Uwzględniając natomiast podział analizowanych dni na okresy deszczowe i bezdeszczowe wykazano, że pojawienie się opadów w żaden sposób nie wpłynęło na redukcję fosforu ogólnego. Świadczy o tym chociażby to, że najmniejszy osiągnięty stopień redukcji związków fosforu odnotowany został w dniach 9.06. i 21.12., które nie

pozostawały pod wpływem opadów, a średnia redukcja tego wskaźnika w czasie pogody mokrej ( $\eta_{\text{sr.Pog.deszcz.}} = 97,8\%$ ) była zbliżona do tej przypisywanej pogodzie suchej ( $\eta_{\text{sr.Pog.bezd.}} = 97,3\%$ ) (rys. 2).



Rys. 2. Redukcja fosforu ogólnego na oczyszczalni ścieków w Trepczy w 2015 roku z uwzględnieniem okresów z pogodą deszczową i bezdeszczową

Fig. 2. Total phosphorus reduction on the Wastewater Treatment Plant in Trepcza in 2015 including rainy and rainless weather periods

Na podstawie zależności (1) określono, że średni udział wód przypadkowych (UWP) w całkowitej ilości ścieków dopływających do oczyszczalni w Trepczy w 2015 roku wyniósł niespełna 5%. Świadczy to o tym, że na całkowitą ilość ścieków odpływających z terenu sanockiej aglomeracji, wody przypadkowe wpływały w bardzo niewielkim stopniu. Procesy biologicznego oczyszczania ścieków nie były zatem zagrożone skutkami nadmiernego rozcieńczenia ścieków surowych niekontrolowanym dopływem wód opadowych, dlatego poziom redukcji związków azotu i fosforu na oczyszczalni w Trepczy, nawet w okresach pogody deszczowej utrzymywał się na tak wysokim poziomie.

#### 4.2. Redukcja związków biogenych na oczyszczalni ścieków w Przemysłu

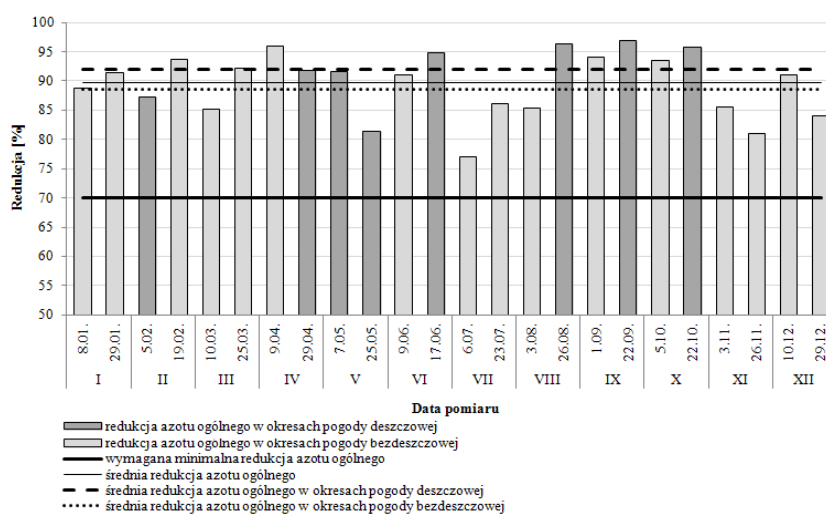
W 2015 roku na oczyszczalni ścieków w Przemysłu azot ogólny redukowany był w większym stopniu niż miało to miejsce na oczyszczalni w Trepczy, także w okresach pogody deszczowej (rys. 5). Średnie stężenie tego wskaźnika w ściekach odprowadzanych do rzeki San było o niespełna 30% mniejsze od wartości dopuszczalnej ( $10,0 \text{ mg/dm}^3$ ). Z kolei odnotowana minimalna koncentracja azotu ogólnego w ściekach oczyszczonych ( $2,9 \text{ mg/dm}^3$ ) była mniejsza od wartości dopuszczalnej o 71,0%, zaś maksymalna koncentracja ( $9,9 \text{ mg/dm}^3$ ) była niemalże równa wartości granicznej (tabela 1, tabela 3).

Tabela 3. Wartości podstawowych statystyk opisowych dla stężeń azotu ogólnego ( $N_{og.}$ ) i fosforu ogólnego ( $P_{og.}$ ) w ściekach unieszkodliwianych na oczyszczalni w Przemyślu w 2015 roku

Table 3. The values of the basic descriptive statistics for total nitrogen ( $N_{tot.}$ ) and total phosphorus ( $P_{tot.}$ ) concentrations in sewage treated on the Wastewater Treatment Plant in Przemyśl in 2015

Nazwa wskaźnika	Jednostka	Rodzaj ścieków	Statystyka opisowa		
			Min.	Max.	Średnia
azot ogólny ( $N_{og.}$ )	mg/dm <sup>3</sup>	surowe	39,0	216,2	85,1
		oczyszczone	2,9	9,9	7,3
fosfor ogólny ( $P_{og.}$ )	mg/dm <sup>3</sup>	surowe	7,7	47,6	23,8
		oczyszczone	0,13	1,20	0,64

Wielkości procentowej redukcji związków azotu zmieniały się od odnotowanej dnia 6.07. (dzień bezdeszczowy) wartości 77,0% do niespełna 97,0% (22.09. – dzień deszczowy). Zarówno te wartości, jak i wyznaczone średnie wielkości redukcji azotu ogólnego w trakcie trwania pogody deszczowej ( $\eta_{sr.Nog.deszcz.} = 92,0\%$ ) oraz bezdeszczowej ( $\eta_{sr.Nog.bezdz.} = 88,5\%$ ), wskazują, że opady atmosferyczne, które wystąpiły w poddanym analizie okresie na obszarze zlewni oczyszczalni w Przemyślu nie wpłynęły na procesy biologicznego usuwania związków azotu (rys. 3).



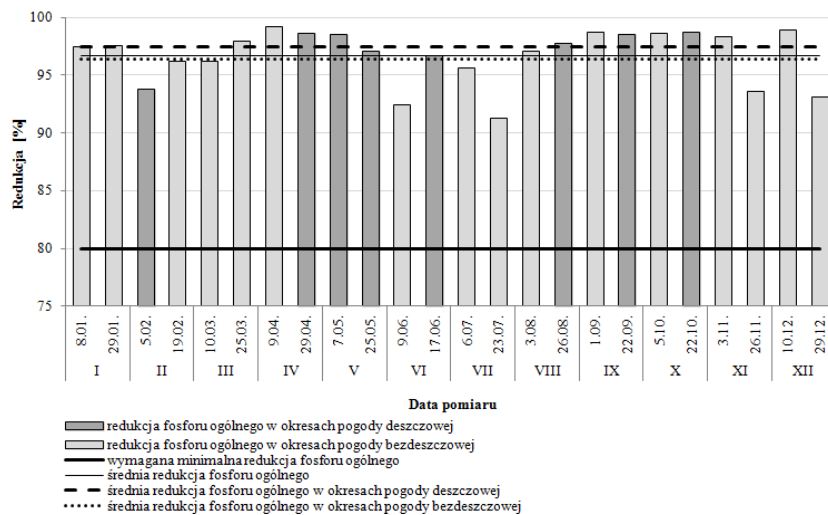
Rys. 3. Redukcja azotu ogólnego na oczyszczalni ścieków w Przemyślu w 2015 roku z uwzględnieniem okresów z pogodą deszczową i bezdeszczową

Fig. 3. Total nitrogen reduction on the Wastewater Treatment Plant in Przemyśl in 2015 including rainy and rainless weather periods

W 2015 roku jakość ścieków odprowadzanych z oczyszczalni w Przemyślu do rzeki San pod kątem stężeń fosforu ogólnego była stosunkowo zróżnicowana,

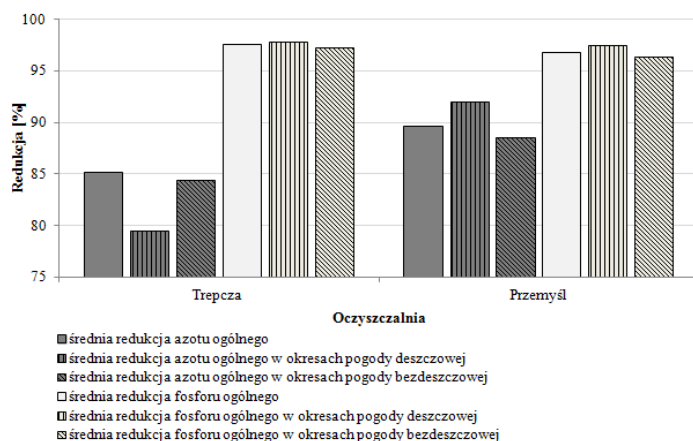
ponieważ stężenia te wahały się od  $0,13 \text{ mg/dm}^3$  do  $1,20 \text{ mg/dm}^3$ , co wskazuje na to, że odnotowywano także wartości przekraczające dopuszczalną koncentrację ( $1,0 \text{ mg/dm}^3$ ) limitowaną przez obowiązujące Rozporządzenie [19]. Niemniej jednak, wyznaczona średnio-roczeńna wielkość tego parametru ukształtowała się na poziomie  $0,64 \text{ mg/dm}^3$ , a więc niższym o ponad 35% od wartości dozwolonej (tabela 1, tabela 3). Podobnie jak w przypadku zmniejszania ilości związków fosforu na sanockiej oczyszczalni, tak i na oczyszczalni w Przemyśle nie zauważa się, aby na zachodzące procesy defosfatacji wpływały warunki pogodowe charakterystyczne dla okresów pogody suchej i mokrej. Potwierdza to wyznaczona wielkość średniej redukcji fosforu ogólnego w dniach z opadem ( $\eta_{\text{sr.Pog.deszcz.}} = 97,5\%$ ), która była większa od wielkości tego parametru wyznaczonego dla dni bezdeszczowych ( $\eta_{\text{sr.Pog.bezdz.}} = 96,4\%$ ). Ponadto, zarówno minimalny, jak i maksymalny poziom redukcji fosforu ogólnego przypisuje się pogodzie bezdeszczowej, co dodatkowo potwierdza brak zależności pomiędzy stopniem redukcji zanieczyszczeń, a warunkami pogodowymi związanymi z występowaniem bądź niewystępowaniem opadów atmosferycznych (rys. 4).

Średni udział wód przypadkowych (UWP) w całkowitej ilości ścieków wpływających do oczyszczalni w Przemyśle w 2015 roku był mniejszy niż ten odnotowany w przypadku obiektu w Trepczy, bowiem wyniósł zaledwie 2,7%. Bardzo niewielka ilość wód przypadkowych, która przedostała się w analizowanym okresie do systemu kanalizacyjnego przemyskiej aglomeracji nie spowodowała rozcieńczenia ścieków surowych poddanych procesom oczyszczania na



Rys. 4. Redukcja fosforu ogólnego na oczyszczalni ścieków w Przemyśle w 2015 roku z uwzględnieniem okresów z pogodą deszczową i bezdeszczową

Fig. 4. Total phosphorus reduction on the Wastewater Treatment Plant in Przemyśl in 2015 including rainy and rainless weather periods



Rys. 5. Redukcja związków biogenych na oczyszczalniach ścieków w Trepczy i w Przemyślu w 2015 roku z uwzględnieniem okresów z pogodą deszczową i bezdeszczową

Fig. 5. Biogenic compounds reduction on the Wastewater Treatment Plants in Trepcza and Przemyśl in 2015 including rainy and rainless weather periods

oczyszczalni w Przemyślu. Dzięki temu, niezależnie od panujących warunków pogodowych, redukcja związków biogenych nie została zaburzona i osiągnęła tak wysoki poziom (rys. 5).

## 5. Podsumowanie

Procesy biologicznego oczyszczania ścieków zachodzące w 2015 roku na oczyszczalniach w Trepczy i w Przemyślu zapewniły wysoki stopień redukcji związków azotu i fosforu do wymaganego poziomu stężeń regulowanego przez obowiązujące prawo, dzięki czemu związki te nie stanowiły zagrożenia dla właściwej jakości wód rzeki San. Pomimo tego, że to drugi z wymienionych obiektów charakteryzował się większą skutecznością w odniesieniu do zmniejszania koncentracji zarówno azotu ogólnego, jak i fosforu ogólnego, to jednak można stwierdzić, że obydwa analizowane oczyszczalnie w właściwy sposób zostały przystosowane do usuwania związków biogenych.

Ponadto w przeprowadzonej analizie wykazano, że na osiągnięty na obydwóch oczyszczalniach ścieków poziom redukcji związków biogenych nie wpłynęły warunki pogodowe związane z występowaniem bądź niewystępowaniem opadów atmosferycznych. Wyznaczone dla okresów pogody mokrej wielkości średniej redukcji azotu ogólnego i fosforu ogólnego były zbliżone do wartości średniej redukcji wyznaczonej dla pogody suchej. Nie zauważa się zatem związku pomiędzy pojawieniem się opadów atmosferycznych, a zmniejszeniem skuteczności usuwania ze ścieków związków azotu i fosforu, które mogłyby na-

stąpić np. na skutek nadmiernego rozcieńczania ścieków surowych wodami opadowymi. Określony udział wód przypadkowych oddziałujących w 2015 roku na systemy kanalizacji sanockiej i przemyskiej aglomeracji były na bardzo niskim poziomie, dzięki czemu problem rozcieńczania ścieków, który mógłby zaburzyć prawidłowość przebiegów procesów usuwania związków biogenych nie wystąpił. Dodatkowo można zatem uznać, że stan techniczny infrastruktury kanalizacyjnej funkcjonującej na terenie sanockiej i przemyskiej aglomeracji zapewnia ich właściwą ochronę przed niekontrolowanym dopływem wód przypadkowych.

## Literatura

- [1] Sadecka Z.: Podstawy biologicznego oczyszczania ścieków, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2010.
- [2] Miksch K., Sikora J.: Biotechnologia ścieków, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [3] Królikowska J., Królikowski A., Żaba T.: Kanalizacja: podstawy projektowania, wykonawstwa i eksploatacji, Wydawnictwo PK, Kraków 2015.
- [4] Łomotowski J., Szpindor A.: Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1999.
- [5] Błazejewski R.: Kanalizacja wsi, PZITS, Poznań 2003.
- [6] Szpindor A.: Zaopatrzenie w wodę i kanalizacja wsi, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1998.
- [7] Kaczor G.: Otwory we włączach studzienek kanalizacyjnych jako jedna z przyczyn przedostawania się wód przypadkowych do sieci rozdzielczej, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 9, 2009, s. 155-163.
- [8] Kaczor G.: Wpływ wiosennych roztopów śniegu na dopływ wód przypadkowych do oczyszczalni ścieków bytowych, Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus, nr 10(2), 2011, s. 27-34.
- [9] Zawilski M., Brzezińska A.: Wpływ przeciążenia biologicznej oczyszczalni ścieków w okresach pogody mokrej na jej sprawność, Ochrona Środowiska, nr 2, 2003, s. 37-42.
- [10] Zawilski M., Brzezińska A.: Bilans ścieków i ładunków zanieczyszczeń dopływających do oczyszczalni ścieków z uwzględnieniem pogody mokrej, Ochrona Środowiska, nr 1, 2003, s. 25-30.
- [11] Brzezińska A.: Zmiany temperatury ścieków ogólnospławnych na podstawie pomiarów on-line, Inżynieria Ekologiczna, nr 26, 2011, s. 290-302.
- [12] Bugajski P., Chmielowski K., Wąsik E.: Wpływ opadów atmosferycznych na temperaturę oraz objętość ścieków w małym systemie kanalizacyjnym, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 4, 2015, s. 1057-1066.
- [13] Bugajski P., Chmielowski K., Kaczor G.: Wpływ wielkości dopływu wód opadowych na skład ścieków surowych w małym systemie kanalizacyjnym, Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus, t. 15, nr 2, 2016, s. 3-11.
- [14] Kaczor G.: Oddziaływanie wód przypadkowych na stężenie związków biogenych w ściekach surowych i oczyszczonych podczas pogody mokrej, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 3, 2012, s. 179-191.

- [15] Raport oddziaływania na środowisko planowanego przedsięwzięcia p.n.: „Przebudowa oczyszczalni ścieków w Trepczy w ramach projektu Poprawa gospodarki wodno-ściekowej w aglomeracji Sanok na działce o nr 566/5 w miejscowości Trepcza”, Sanok, styczeń 2010.
- [16] Propozycja planu obszaru aglomeracji Sanok z oczyszczalnią ścieków w Trepczy opracowana w gminie Sanok przy udziale Urzędu Miasta Sanoka, Sanok, wrzesień 2013.
- [17] Sprawozdanie z realizacji Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych (KPOŚK) za rok 2015.
- [18] Winczura M.: Oczyszczalnia ścieków w Przemysłu, Forum Eksploatatora, nr 5(80), 2015, s. 20-23.
- [19] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego [Dz.U. 2014 poz. 1800].
- [20] Chmielowski K., Rajchel B., Karnas M.: Analiza skuteczności działania oczyszczalni ścieków „Kujawy”, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture. JCEEA, z. 63 (2/I/16), s. 31-42. DOI:10.7862/rb.2016.107.

## **REDUCTION OF THE BIOGENIC COMPOUNDS ON SELECTED WASTEWATER TREATMENT PLANTS OF PODKARPACKIE PROVINCE INCLUDING DRY AND WET-WEATHER CONDITIONS**

### **S u m m a r y**

In the article, the analysis of the reached reduction degree of total nitrogen and total phosphorus in 2015 on the two selected wastewater treatment plants of Podkarpackie Province was performed. As it turns out, the processes of biological sewage treatment on the both research objects provided a high level of biogenic compounds reduction. It was noted that the weather conditions related to the rainy or rainless weather did not affect the effectiveness of nitrogen compounds and phosphorus compounds concentration reduction. There is a risk, that an excessive amounts of rain water in sewage systems can contribute to the reduction of biodegradability organic matter as a consequence of sewage dilution and resulted in reduction sewage treatment effectiveness.

**Keywords:** sewage, wastewater treatment plant, reduction, total nitrogen, total phosphorus, rainless weather, rainy weather

*Przesłano do redakcji: 4.05.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Marek URBANIK<sup>1</sup>  
Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK<sup>2</sup>

## SELECTED ISSUES OF GAS SUPPLY SAFETY

Safety of gas supply is considerably depended on failure occurrence. Gas networks constitute large assets of gas companies, therefore it is crucial for them to maintain safe and reliable functioning of gas infrastructure. The disaster caused by gas explosion may cause very large material and human losses. The presented approach can be used to describe the losses being a result of failure of gas network. It can provide information for assessing gas supply systems in regards to the costs and losses related to failure occurrence in gas pipes. The analysis was based on the operational data obtained from the operation of gas network.

**Keywords:** gas network, gas losses, gas network failure, gas network functioning

### 1. Introduction

The current technical progress influences the growing requirements for the safe operation of critical infrastructure, including the gas supply system [21].

According to the European Gas Pipeline Incident Data Group through the period of five years the average and total number of failures has consistently reduced over the years with the tendency to stabilization [4, 5]. At the same time gas consumption has increased affecting the continuous development of gas pipelines, also the requirements of customers referred to the reliability of the operation of gas systems are growing [23, 24].

It should be emphasized that the discussed topics are important from the point of view of domestic customers, who are the most numerous group constituting 97% of the total group of recipients [1, 10]. On the other hand, taken into account the quantity of the sold natural gas, most of it was purchased by industrial customers, as much as 62% of which were dominated by fuel companies, including chemical, refining, petrochemical and nitrogenous companies [8, 9, 22].

Proper functioning of gas systems constitutes the important issue, as leakage of gas into the atmosphere during the failure creates a risk of explosion and

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Marek Urbanik, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651408, d314@stud.prz.edu.pl

<sup>2</sup> Barbara Tchórzewska-Cieślak, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651435, cbarbara@prz.edu.pl

fire, by which accidental people or customers, as well as employees of gas plant, can be injured [2, 19, 20, 25].

Safety of gas supply should ensure stable supply at a level guaranteeing the recipient's needs and with the costs accepted by economy and society, assuming the optimal use of domestic energy resources and the diversification of gas supply sources [14, 17 18].

Therefore the current problems are associated with increasing safety of gas supplies, as well as minimizing the risks for the users and their protection during the operation of the gas system, as well as through new investments or modernization [12, 13].

The current energy policy is based on the project of the Polish Energy Policy until 2050, taking into account the provisions of the Directive 2009/73/EC of the European Parliament and the Council of 13 July 2009 concerning common rules for internal gas market and aims to provide the following issues: the diversification of sources of supply through diversification of supply, the stability of the political situation, as well as drawing attention to the geographical location of sources of supply, domestic or foreign [3]. Attention is also focused on fuel storage, ownership of energy sector companies and supply system, indication if it is state or commerce, supervision and regulation of the system by the state through scope and efficiency of supervision. The important issue is to control supply system condition, through transmission capacity, technical condition and reliability, which is associated with forecasting, planning, development and investment decisions [15].

Therefore in the paper the analysis concerning undesirable events occurring in gas supply system was performed, as well as the issues connected with failure of gas network were analysed.

## **2. Case studies of undesirable events resulting from gas network failure**

Transport of natural gas by gas pipelines is one of the safest way of transport of this fuel. However, during this type of transport some failures occur, which sometimes have very serious consequences [2, 11]. A particular threat is unsealing of the gas pipeline located in the ground, because of the location such a failure is noticed after a long time.

The most common causes of unsealing of the underground gas pipelines are [1]:

- splitting welds,
- mechanical damage, e.g. by an excavator bucket during construction work,
- unsealing of threaded connections,
- corrosion of gas pipelines,
- improper gas composition, which damages the gas pipeline from the inside.

The fastest to be detected is pipeline leak caused by mechanical damage, because such a failure is immediately noticed by a perpetrator. Gas leaking from a gas pipeline into the ground can cause a number of negative effects, the size of which depends on the site of leak - it depends on the possibility of gas migration after leaving the pipeline and this, in turn, depends on the geological conditions and underground infrastructure next to the site of pipeline damage.

The typical negative effects of the underground gas pipeline unsealing include the destruction of vegetation (due to the negative impact of methane on the root system of the plants), a fire that can occur if gas gets outside through the slits in the ground. A particularly dangerous situation is when the gas from the underground gas pipeline enters the underground sewerage system, telecommunications infrastructure, etc. Through these channels gas can enter the buildings and, if not detected, can lead to poisoning people being there or, if gets the appropriate concentration, to explosion. Gas migrating from damaged pipeline to the buildings was often a cause of catastrophe even in the buildings without a gas installation.

The escaping natural gas from the damaged underground gas pipeline probably contributed to the gas explosion in a multi-family building in Pruszcz Gdański. It happened in January 2017. As a result of the gas explosion the top of the building collapsed, which caused that, according to the inspectors, further living in this building due to significant damage was not possible. There were no fatalities but one person was hospitalized. The building in which the explosion occurred was not connected to the gas network. Probably natural gas got to the building from the cracked weld of the gas pipeline running under the building.

In September 2013, in the village of Dormowo, the high pressure gas pipeline was unsealed. Due to the threat of gas explosion, 200 people living near the site of the failure were evacuated. The pipeline was damaged in the peat field. The blast caused by the gas outflow caused the nearby buildings to be covered with peat dust. The failure was detected by the sensors that monitor the pressure in the gas pipeline. As a result of the failure no one was injured and no fatalities occurred. A probable cause of failure were construction works performed along the damaged gas pipeline [6].

In Leszno, in July 2017, as a result of the gas pipeline unsealing the gas entered the sewers where it reached an explosive concentration. In order to minimize the likelihood of an explosion in the area, the electricity supply was turned off and 100 people were evacuated. The failure was reported at 10 p.m., the removal of the failure lasted until the morning and then the residents returned to their homes and the electricity supply was resumed [7].

The presented failures which happened recently were caused by unsealing of the gas pipeline. In the given examples, fortunately, there were no major losses, but, unfortunately, in the past there were some gas pipeline failures as

a result of which the fatalities occurred. An example may be the year 2013 and unsealing of the high pressure gas pipeline as a result of construction works in Jankow Przygodzki. Two people were killed as a result of the failure, while thirteen people were injured, seven of them were hospitalized. As a result of the fire, ten residential buildings were completely burned down. At this moment, the biggest catastrophe associated with unsealing of the gas pipeline in Poland should be also mentioned. It was the natural gas explosion in the Rotunda PKO in Warsaw, which took place in February 1979. The failure occurred due to the rupture of the valve housing in the pipeline, causing leakage of gas to the ground, as a result of the low temperature there were slits in frozen ground by which gas escaped to the technical channels and further to the building. Upon reaching the explosive concentration, there was the explosion inside the building. It is worth mentioning, that the low temperature caused the condensation of the gas deodorizing agent, which made the gas odourless and difficult to be detected. It is also worth mentioning that the Rotunda building was not connected to the gas network. In this disaster 49 people were killed, 135 injured, 77 of them were hospitalized.

### 3. Threat to the proper functioning of the gas network

The result of pipeline unsealing is a leak of gas. If the escaping gas in the air reaches a suitable concentration and the ignition source exists (for example a spark), the ignition and then a fire or explosion occurs.

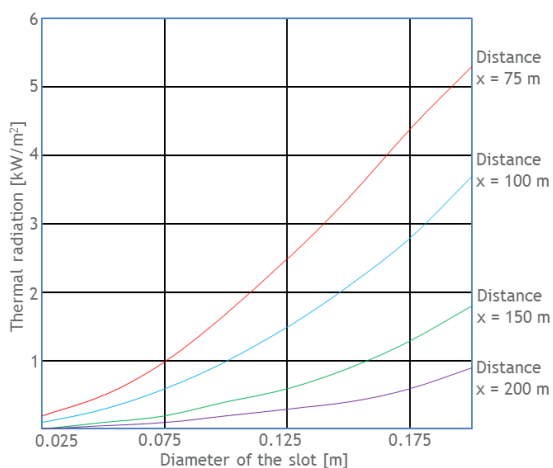


Fig. 1. Thermal radiation according to the diameter of slit in the gas pipeline at a pressure of 1.5 MPa, own work on the basis of [16]

Rys. 1. Promieniowanie cieplne w zależności od średnicy szczeliny dla gazociągu o ciśnieniu 1,5 MPa, opracowano na podstawie [16]

An explosion will occur if combustion of gas appears almost simultaneously in the entire volume of the gas mixture with air. In such case, the effect is the shock wave, which will cause the greatest damage. However, not always a result of the gas leak is an explosion. If combustion takes place gradually there is a fire which causes the biggest damage through thermal radiation. In the Figure 1 the value of thermal radiation depending on the diameter of the slit in the gas pipeline where the gas pressure is 1.5 MPa was presented.

It is obvious that the larger the gas leakage gap, the higher the thermal radiation value. At the same time, with the given gas leakage gap diameter and closer to the leakage source, the value of the thermal radiation increases. For example, for a gap of 0.175 m at a distance of 75 meters from the source of fire, the thermal radiation value is over 5 kW/m<sup>2</sup> and 200 meters from the combustion site the thermal radiation decreases by about 1 kW/m<sup>2</sup>.

The pipelines run both in inhabited and non-inhabited areas. If gas leakage occurs in area inhabited by humans, it is obvious that the probability that a person will be in a zone of thermal effect of burning gas is high.

In the Figure 2 the percentage of fatalities according to the time of exposure and the diameter of the gap in the gas pipeline was shown.

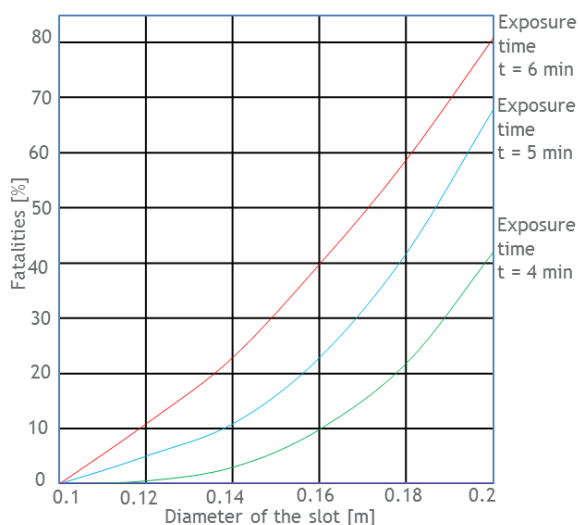


Fig. 2. Percentage of fatalities according to time of exposure for the gas pipeline at the pressure of 1.5 MPa, own work on the basis of [16]

Rys. 2. Procent ofiar śmiertelnych w zależności od czasu ekspozycji dla gazociągu o ciśnieniu 1,5 MPa, opracowano na podstawie [16]

With the increase in the diameter of the gap and the time of exposure to thermal radiation, the number of fatalities increases. For example, with a gap of 0.2 m and the radiant exposure time of 6 minutes, the percentage of deaths among people exposed to heat radiation increases to more than 80%.

From the above it follows that it is necessary to avoid the location of, particularly, high and medium pressure pipelines in places of human habitats. Of course, in many cases it is not possible, then materials which have a small crack propagation should be used, so that in case of breakage the gap will be small which will result in less thermal radiation.

#### **4. Conclusion**

In recent years, due to the growing residential areas, the length of the gas pipelines is increasing, and the probability of their failure also increases. The observed development of the gas supply network does not protect against the failure occurrence of the gas network. Safety assessment in the operation of gas supply system may contribute to reducing the potential consequences of undesirable events. The randomness of the occurrence of failure causes that conducting research related to the operation of the gas network is quite difficult and complex, first of all taking into account available operational data. It should also be noted that the escaping of natural gas can cause a threat to the environment.

In spite of the increase of safety-related procedures for the gas network functioning, gas network failures are still recorded, as presented in the examples of failures which have occurred recently, and often pose a serious threat to human health and life.

Therefore, as gas network forms a complex system and it is characterized by the unpredictability and randomness of failure occurrence, it involves proper analysis of its functioning. As gas companies are obliged to supply gas in reliable and safe way to the recipients, it is therefore appropriate to develop new research methods that will minimize the likelihood of gas pipeline failures and reduce their impact if the failure has already occurred. Such approach will be helpful in performing assessment of proper functioning of the gas systems.

#### **Literature**

- [1] Dieckhoener C., Lochner S., Lindenberger D.: Simulating the Effects of European Natural Gas Infrastructure Developments, *Oil Gas-European Magazine*, 36(4) 2010, pp. 174-185.
- [2] Dietrich A., Migracja gazu związana z nieszczelnością dystrybucyjnej sieci gazowej. *Nafta-Gaz*, 2016, nr 1, s. 40-44, DOI:10.18668/NG2016.01.05.

- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/73/WE z dnia 13 lipca 2009 r. dotycząca wspólnych zasad rynku wewnętrznego gazu ziemnego.
- [4] European Gas pipeline Incident data Group (EGIG), 5-9<sup>th</sup> Reports of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970-2013). Doc. No EGIG 14.R.0403, 11.R.0402, 08.TV-B.0502, 05.R.0002, 02.R.0058, Amsterdam 2002, 2005, 2008, 2011, 2015.
- [5] European Gas pipeline Incident data Group (EGIG): Report of Study Group 3.4. A Guideline "Using or Creating Incident Databases for Natural Gas Transmission Pipelines", Amsterdam 2006, The Netherlands.
- [6] <https://wiadomosci.wp.pl/rozszerzenie-gazociagu-w-lesznie-ewakuacja-mieszkancow-6027391890547841a> [access 10.2016].
- [7] <https://www.tvn24.pl/pomorze,42/juszkowo-wybuch-zniszczyl-ich-dom-rodziny-czekaja-na-pomoc,710660.html> [access 10.2016].
- [8] International Association of Oil & Gas Producers (OGP): Health and Safety data reporting system user guide - 2011 data (May 2013).
- [9] International Association of Oil & Gas Producers (OGP): Operating Management System Framework for controlling risk and delivering high performance in the oil and gas industry (Jun 2014).
- [10] International Association of Oil & Gas Producers (OGP): Risk assessment data directory. Report No. 434-7, March 2010.
- [11] Majid, Z.A., Mohsin, R., Yaacob, Z., Hassan, Z.: Failure analysis of natural gas pipes, (2010) *Engineering Failure Analysis*, 17 (4), pp. 818-837.
- [12] Rak J.: Metoda planowania remontów sieci wodociągowej na przykładzie miasta Krosna (Method of the water supply network planning repair on the example of the Krosno city), *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, t. XXXI, z. 61 (1/14), 2014, s. 225-232. DOI:10.7862/rb.2014.15.
- [13] Rak J.R.: Propozycja oceny dywersyfikacji objętości wody w sieciowych zbiornikach wodociągowych (The proposal of diversification assessment of water volume in water supply network tanks). *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, 2015, No 1, pp. 339-349. DOI:10.7862/rb.2015.23.
- [14] Rak J., Pietrucha-Urbanik K. New directions for the protection and evolution of water supply systems - smart water supply. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, 2015, No z. 3/I, pp. 365-373. DOI:10.7862/rb.2015.121.
- [15] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 713/2009 z dnia 13 lipca 2009 r. ustanawiające Agencję ds. Współpracy Organów Regulacji Energetyki - ACER.
- [16] Rusin A., Stolecka K.: Poważne uszkodzenia gazociągów i ich skutki (Serious damage to pipelines and their effects). *Rynek Energii*, 2009, nr 6, s. 97-102.
- [17] Shalaby, H.M., Riad, W.T., Alhazza, A.A., Behbehani, M.H.: Failure analysis of fuel supply pipeline, *Engineering Failure Analysis*, 13 (5)2006, pp. 789-796.

- [18] Tchórzewska-Cieślak B., Rak J., Analiza modernizacji remontów dystrybucyjnej sieci gazowej na przykładzie miasta Rzeszowa (Analysis of modernization and repaired distributive gas systems based on the example of the city of Rzeszow). *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2003, No 2, pp. 222-229.
- [19] Tchórzewska-Cieślak B., Rak J., Metoda wyznaczania niezawodności podsystemu dystrybucji gazu ziemnego dla jednostek osadniczych (Method of determining the reliability of the natural gas distribution subsystem for settlement units). *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2001, No 12, pp. 222-229.
- [20] Tchórzewska-Cieślak B., Rak J., Ryzyko w systemie zaopatrzenia w gaz ziemny (Risk in natural gas supply system). *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2003, No 2, pp. 231-242.
- [21] Tchórzewska-Cieślak B.: Method of assessing of risk of failure in water supply system. European safety and reliability conference (ESREL), Risk, reliability and societal safety, Taylor & Francis, 2007, vol. 2, pp. 1535-1539.
- [22] UOKiK, <http://www.ure.gov.pl/portals/pdb/459/4588/2011.html> [access 10.2016].
- [23] Urbanik M., Tchórzewska-Cieślak B.: Ecological aspects of the natural gas use, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, JCEEA, t. XXXII, z. 62(1/15), s. 409-417. DOI:10.7862/rb.2015.29.
- [24] Urbanik M., Tchórzewska-Cieślak B.: Podstawy analizy niezawodności funkcjonowania instalacji wykorzystujących gaz ziemny, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, JCEEA, t. XXXII, z. 62 (1/15), s. 419-431. DOI:10.7862/rb.2015.30.
- [25] Witek M. Ryzyko eksploatacji sieci przesyłowej gazu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (Exploitation risk in gas transmission grids), 2001, Nr 1, s. 19-23.

## WYBRANE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE BEZPIECZEŃSTWA DOSTAW GAZU

### Streszczenie

Bezpieczeństwo dostaw gazu jest znacznie uzależnione od wystąpienia awarii. Sieci gazowe stanowią duże aktywa zakładów gazowych, dlatego kluczowe znaczenie ma dla nich utrzymanie bezpiecznego i niezawodnego funkcjonowania infrastruktury gazowej. Katastrofa spowodowana wybuchem gazu może nieść za sobą bardzo duże straty materialne i ludzkie. Przedstawione podejście można wykorzystać do opisanego strat wynikających z awarii sieci gazowej. Może również dostarczyć informacji na temat oceny systemów dostaw gazu w odniesieniu do kosztów i strat związanych z awarią sieci gazowych. Analiza oparta była na rzeczywistych danych uzyskanych na podstawie eksploatacji sieci gazowej.

**Słowa kluczowe:** sieć gazowa, straty gazu, funkcjonowanie sieci gazowej, awaria sieci gazowej

*Przesłano do redakcji: 15.11.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 15.06.2017 r.*



Nadezda STEVULOVA<sup>1</sup>  
Ivana SCHWARZOVA<sup>2</sup>

## INFLUENCE OF ALTERNATIVE BINDER ON THE PROPERTIES OF HEMP HURDS COMPOSITES

Composites based on natural fibres as organic filler are studied for several years because traditional building materials such as concrete are increasingly being replaced by advanced composite materials (fibre reinforced cement). The current trend in the construction industry is the effort to achieve sustainable development using rapidly renewable material resources instead of limited raw materials as well as using alternative materials. The need for development of promising and environmentally friendly materials is related to the industrial interest in the use of natural plant fibres as reinforcement into lightweight composites. The attention is given to hemp fibres as a substitute for synthetic fibers in lightweight composites due to their unique mechanical, thermal insulation, acoustic and antiseptic properties. Optimizing the adhesion of hemp plant fibre to the inorganic matrix in the composite is related to the modification of hemp fibers and/or the appropriate option and treatment of binder. In this paper, the attention is given to the study properties of composite based on hemp hurds as filler and alternative binder (MgO-cement). The hemp as a building composite component is rapidly renewable, carbon-negative, non-toxic, mildew-resistant and pest-free. Cement based on MgO seems to be a suitable binding agent for composites based on hemp hurds. Experimental work is focused on the study of impact of alternative binder on the selected properties of prepared lightweight composites and variation of mixtures based on hemp hurds and alternative binder focused on the MgO and SiO<sub>2</sub> component (silica sand and silica fume in variation). The evaluation of the physical and mechanical properties of hemp hurds composites with alternative binder is given. The results have shown that by incorporating hemp hurds into a magnesium oxide cement matrix it is possible to prepare materials with suitable thermal insulating properties usable in non-load-bearing structures.

**Keywords:** alternative binder, hemp hurds, lightweight composites, physico-mechanical properties

---

<sup>1</sup> Author for correspondence / autor do korespondencji: Nadezda Stevulova, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 04200, Kosice, Slovakia, +421556024126, nadezda.stevulova@tuke.sk

<sup>2</sup> Ivana Schwarzova, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 04200, Kosice, Slovakia, +421556024278, ivana.schwarzova@tuke.sk

## 1. Introduction

Innovative building solutions for conserving non-renewable resources are connected with development of sustainable building materials based on renewable natural raw material resources. Technical hemp is becoming a major focus of green housing because of its energy-efficient cultivation as well as its health benefits to living. Due to the low density and high porosity of the hemp hurds, the combination of hemp and binder creates a building material with good thermal and acoustic insulation properties. Many studies on fibrous composites were carried out in order to understand the influence of various parameters, like binder nature, plant origin and fibre treatment on the mechanical properties of resulting composites [1-5].

The interaction of the fibres and mineral binder is very important factor in the development of composite mechanical properties [3].

Based on literature data and our previous research the binder nature is one of the key factors affecting the properties of lightweight composites based on hemp hurds [2, 6, 7]. Composite building material combining cementitious binders (limes and cement) with hemp hurds is generally referred to hemp concrete or hempcrete. Hemp hurds composites based on alternative binder MgO-cement have shown higher compressive strength values in comparison to composites with hydrated lime with cement addition [8].

The properties of hemp composites prepared with MgO-cement as alternative binder depend on the formation of M-S-H gel (phase in the system MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) in composite system [9].

This article includes results of the hemp composite properties based on alternative binder MgO-cement. The impact of mixture variations on the physical and mechanical properties (compressive strength, density, water absorption, thermal conductivity) of the hemp hurds composites hardened in indoor condition for a time period is studied.

## 2. Materials and methods

Technical hemp hurds used as filler into composites in this study is coming from Netherlands company Hempflax. This hemp sample contains more hurds material than bast fibres and used hemp material was polydispersive (wide particle length distribution 8-0.063 mm) with density 117.5 kg.m<sup>-3</sup>.

MgO-cement was used as an alternative binder to hemp composites. MgO-cement as non-traditional binder consists of magnesium, silica and alkaline component. Caustic magnesite (CCM 85, SMZ a.s. Jelsava, Slovakia) with chemical composition MgO – 84%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 7.5%, CaO – 5.5%, SiO<sub>2</sub> – 1.0 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0.2% was used as a magnesium component of alternative binder called MgO-cement. As silica component of alternative binder were used silica sand (Sastin, Slovakia) with the dominant component of SiO<sub>2</sub> (95-98 %) and silica

fume (Istebne, Slovakia) with amorphous silica min. 85%. Silica component in the binder is necessary to ensure the formation of M-S-H ( $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ) phase in composite system [9].

The variable component of the MgO-cement was an alkaline admixture in the form of sodium hydrogen carbonate  $\text{NaHCO}_3$  (p.a). Caustic magnesite has been milled in order to reduce its particle size in laboratory vibratory mill VM 4 for 5 minutes [10].

Experimental mixtures with original hemp hurds were prepared according to the recipe published in work [11] and its variations given in Table 1. The components of mixture were homogenized in dry way and then mixed with water addition. Standard steel cube forms with dimensions 100x100x100 mm were used for preparation of samples in accordance with the standard STN EN 12390-2 [12]. The specimens of fibrous composites were cured for 2 days in an indoor climate and then were removed from the forms. Curing was continued under laboratory conditions during 26 days.

Table 1. Experimental mixtures of hemp composites

Tabela 1. Tytuł tabeli w języku polskim

Sample	Composition of mixture [vol.%]					
	Hemp hurds	MgO	Silica sand	Silica fume	$\text{NaHCO}_3$	Water
1	40	9,66	9,66	-	9,66	31
2	40	19,33	9,66	-	-	31
3	40	19,33	-	9,66	-	31

The physico-mechanical parameters were measured on hardened specimens under laboratory conditions. The resulting values are the average of three measurements. Density was determined in accordance with standard STN EN 12390-7 [13]. Thermal conductivity coefficient of samples, as the main parameter of heat transport was measured by the commercial device ISOMET 104 (Applied Precision Ltd., Germany). Short-term water absorption (1h) was specified in accordance with the standard STN EN 12087/A1 [14]. Compressive strength of all fibrous composites was determined as the maximum load per average cross-sectional area using the instrument ADR 2000 (ELE International Ltd., United Kingdom) in accordance with the standard STN EN 12390-3 [15].

### 3. Results and discussion

As can be seen in Table 2, selected physical and mechanical properties of hemp-based composites vary depending on the mixture composition.

The values of bulk density after 28 days of samples hardening were ranged from 790 to 910  $\text{kg.m}^{-3}$ . The lowest bulk density has the sample 3 prepared

without alkaline component and with silica fume as the source of the silica component for providing binder hydration processes. This fact is due to the lower initial bulk density of silica fume. Compared to a sample with the same mixture composition made with silica sand as a source of silica component (sample 2), decrease in this parameter for sample 3 was observed by 20 %.

Table 2. Properties of experimental mixtures of hemp composites

Tabela 2. Tytuł tabeli w języku polskim

Sample	Density [kg.m <sup>-3</sup> ]	Thermal conductivity [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Water absorption (1h) [%]	Compressive strength [MPa]
1	890	0.195	22.4	1.55
2	910	0.205	19.8	2.85
3	790	0.190	17.5	3.15

The average thermal conductivity coefficient of all mixture samples is 0.197 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. This value confirms the possibilities of using prepared hemp - composites as insulating materials.

Study of sorption behaviour of fibrous composites is very important due to poor resistance to the moisture coming from organic nature of fibre [16]. The values of short-term water absorbability of samples ranged between 17.5 and 22.4%, with the lowest absorbability reached by sample 3.

The compressive strength of testing samples ranged from 1.55 MPa to 3.15 MPa, with the highest value of the strength parameter reaching by the sample with the lowest bulk density (sample 3) where the silica fume was used in the mixture as the source of silica component of binder. This active ingredient has good assumption in the composite to improve its strength parameter as described in the work [17]. The composite prepared with silica fume (sample 3) achieved a higher strength parameter compared to the composite prepared with silica sand (sample 2). Silica fume strengthens specimens by strengthening the bond between MgO and silica particles. Due to the higher reactivity of the silica fume particles the M-S-H phases are probably formed. It results in a denser interface between particles in system and the more compact structure of composite is created. The substitution of silica sand with more reactive silica fume in composites mixture showed the possibilities of its use in the preparation of hemp composites with better physico-mechanical properties.

#### 4. Conclusion

This paper deals with composites based on hemp hurds as filler and alternative binder MgO-cement and variation of this MgO-cement composition (magnesium component, silica component and alkaline component). Comparison

of the various composites mixtures showed that replacement of silica component in MgO-cement with more reactive silica fume without alkaline component in samples mixture demonstrated the possibility of its using in fibrous composites preparation with improved physic-mechanical properties. Characteristics of hemp composites prepared with binder based on MgO predetermine this material as a sustainable and carbon – negative which can be applied as a non – load bearing material with good thermal – insulating properties.

### **Acknowledgement**

*Authors are grateful for the financial support of experimental works to Slovak Grant Agency by project VEGA 1/0277/15.*

### **Bibliography**

- [1] Sedan D., Pagnoux S., Smith A., Chotard T. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*. Vol. 28. pp. 183-192, 2008.
- [2] Cigasova J., Stevulova N., Junak J. Influence of binder nature on properties of lightweight composites based on hemp hurds. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. Vol. 5. pp. 27-31, 2013.
- [3] Valadez-Gonzalez A., Cervantes J.M., Olayo R., Herrera Franco P.J. Effect of fibres surface treatment on the fibres-matrix bond strength of natural fibres reinforced composites. *Composites: Part B*. Vol. 30. pp. 309-320, 1999.
- [4] Stevulova N., Schwarzova I. Changes in the properties of composites caused by chemical treatment of hemp hurds. *International Journal of Chemical, Biomolecular, Metallurgical, Materials Science and Engineering*. Vol. 8. pp. 363-367, 2014.
- [5] Kidalova L., Terpakova E., Stevulova N., Sicakova A. Application of hemp in preparation of building materials. *Czasopismo Techniczne*. Vol. 108. No. 8, pp. 107-112, 2011.
- [6] Kidalova L., Terpakova E., Stevulova N. MgO cement as suitable conventional binder's replacement in hemp concrete. *Pollack Periodica*. Vol. 6. pp. 107-112, 2011.
- [7] Čigášová J., Števíulová N., Sičáková A. New biocomposites based on hemp hurds. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. Vol. 32. No. 62, pp. 75-81, 2015.
- [8] Kidalova L., Stevulova N., Terpakova E., Sicakova A. Utilization of alternative materials in lightweight composites. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 34, pp. 116-119, 2012.
- [9] Stevulova N., Schwarzova I., Estokova A., Holub M. MgO-based cement as an inorganic binder for hemp hurds composites. *Cheminé Technologija*. Vol. 67, pp. 24-29, 2016.
- [10] Kidalova, L. Determination of selected characteristics in hemp concrete. In: *Young Scientist: 3rd PhD. Student Conference of Civil Engineering and Architecture*. Košice. Slovakia. pp. 1-6, 2011.
- [11] Bydzovsky, J. Utilization of rapidly renewable raw materials in building materials. In: *Proceedings of the 12th International Scientific Conference*. Brno Technical University, Brno, Czech Republic. pp. 43-46, 2009.

- [12] STN EN 12390-2 Testing hardened concrete. Part 2: Making and curing specimens for strength tests.
- [13] STN EN 12390-7: 2011 Testing hardened concrete. Part 7 Density of hardened concrete.
- [14] STN EN 12087/A1: 2013 Thermal insulating products for building applications. Determination of long term water absorption by immersion.
- [15] STN EN 12390-3: Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [16] Stevulova N., Cigasova N., Purcz P., Schwarzova I., Kacik F., Geffert A. Water absorption behavior of hemp hurds composites. *Materials*. Vol. 8. pp. 2243-2257, 2015.
- [17] Poon C.S., Kou S.C., Lam L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 20. pp. 858-865, 2005.

## WPŁYW ALTERNATYWNEGO SPOIWA NA WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTU Z WŁÓKNAMI KONOPNYMI

### Streszczenie

Od kilku lat badane są kompozyty na bazie włókien naturalnych jako wypełniacze organiczne, ponieważ tradycyjne materiały budowlane, takie jak beton, są coraz częściej zastępowane zaawansowanymi materiałami kompozytowymi (cement wzmocniony włóknami). Obecną tendencją w branży budowlanej jest dążenie do osiągnięcia zrównoważonego rozwoju przy wykorzystaniu szybko odnawialnych surowców, a nieograniczonych surowców, a także przy użyciu alternatywnych materiałów. Potrzeba opracowania ekologicznych dla środowiska materiałów jest związana z przemysłowym wykorzystaniem naturalnych włókien roślinnych jako zbrojenia do lekkich materiałów kompozytowych oraz włókien konopnych jako substytut włókien syntetycznych w lekkich kompozytach ze względu na ich unikalne własności mechaniczne, termoizolacyjne, akustyczne i antyseptyczne. Optymalizacja przyczepności włókna roślinnego konopi do matrycy nieorganicznej w kompozycie jest związana z modyfikacją włókna konopnego i/lub odpowiednią opcją i obróbką spoiwa. W niniejszym dokumencie zwrócono uwagę na właściwości badawcze kompozytu bazującego na opaskach konopnych (w odcieniach drewna konopi) jako wypełniacza i alternatywnego środka wiążącego (MgO-cement). Konopie jako komponent złożony z budynków są szybko odnawialne, są odporne na węgiel, nietoksyczne, odporne na pleśń i wolne od szkodników. Wydaje się, że cement na bazie MgO jest odpowiednim środkiem wiążącym dla kompozytów na bazie konopi. Eksperymentalne prace koncentrują się na badaniu termicznego przetwarzania naturalnego surowego materiału magnezytowego do jego późniejszego wykorzystania jako alternatywnego składnika wiążącego do lekkich materiałów kompozytowych oraz zróżnicowania mieszanek kompozytowych opartych na opaskach konopnych i alternatywnym środku wiążącym skupionym na składniku MgO i SiO<sub>2</sub>. Ocenę fizycznych i mechanicznych właściwości konopnych prasuje kompozyty z alternatywnym spoiwem. Wyniki wykazały, że poprzez włączenie konopnych włókien do matrycy cementowej tlenku magnezu można przygotować materiały o odpowiednich właściwościach termoizolacyjnych użytych w konstrukcjach nie obciążających.

**Słowa kluczowe:** spoiwo alternatywne, włókna konopne, lekkie kompozyty, właściwości fizyko-mechaniczne

*Przesłano do redakcji: 24.03.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.09.2017 r.*

Jarosław ZAWADZKI<sup>1</sup>

## PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII PODCZAS PROCESU REWITALIZACJI WIELKOPŁYTOWEJ TKANKI MIEJSKIEJ, NA PRZYKŁADZIE OSIEDLA PIASTOWSKIEGO W POZNANIU

W przeciągu ostatnich lat projektanci nowopowstałych budynków mieszkaniowych walczą o upowszechnienie proekologicznych rozwiązań. Opisywany proces ma na celu poprawę warunków bytowych oraz stanu środowiska naturalnego. W ścisłej zabudowie miejskiej, a mianowicie w zabudowie wielkopłytowej, dostrzec można ogromny potencjał, który w ostatnich latach jest ignorowany. Wolne tereny między poszczególnymi jednostkami mieszkalnymi zostają uzupełniane o elementy nowoczesnej architektury. Proces ten ma negatywny wpływ na wizerunek tych struktur. Program rewitalizacji wielkopłytowej tkanki miejskiej należy poprzedzić szeregiem konsultacji społecznych uzupełnionych o możliwości zastosowania nowoczesnych technologii. Podobne inicjatywy są powszechnie realizowane za naszą zachodnią granicą. Realizacja proponowanych założeń powinna nastąpić w pełnej zgodzie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Zmiana myślenia o modułowych przestrzeniach jest kluczowym krokiem w kierunku wdrożenia powyższych idei w opracowywanych projektach. Relikt przeszłości, jakim jest budynek z wielkiej płyty, może stać się czymś więcej niż tylko tymczasowym miejscem pobytu. Modułowa architektura XX wieku przejawia w swojej prostocie wiele interesujących rozwiązań, które w ówczesnych czasach były wręcz nowatorskie. Niestety na przestrzeni lat jej wizerunek uległ znaczącej degradacji. Wprowadzenie nowoczesnych technologii do obiektów może stać się szansą dla poszczególnych obszarów, bądź jednostek na rozwój. Zwiększenie funkcjonalności, naprawa wizerunku, a także rozwój aspektów ekologicznych uważa się powszechnie za niezbędne wytyczne, służące opracowaniu rzetelnego procesu rewitalizacyjnego. Proponowane założenia poprawią nie tylko sylwetkę przestrzenną, lecz przyczynią się również do rozwiązania wielu problemów socjologicznych.

**Słowa kluczowe:** wielorodzinne zespoły mieszkaniowe, rehabilitacja zabudowy modernistycznej, innowacyjność, funkcjonalność

---

<sup>1</sup> Jarosław Zawadzki, Politechnika Poznańska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań; tel. 796945110; studiobryly@gmail.com

## 1. Geneza modułowego budownictwa miejskiego

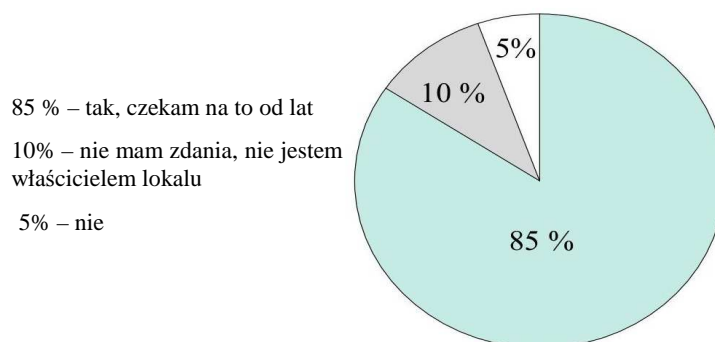
Zmiany polityczno- ekonomiczne, jakie dostrzec można było w drugiej połowie XX wieku ukazują w sposób znaczny narastający deficyt mieszkaniowy, z jakim borykały się liczne organy administracji publicznej. Działania wojenne z lat 1939- 1945 wpłynęły na ogromną destrukcję potencjału struktury wielorodzinnej polskich miastach. W wielu przypadkach zniszczeniu uległo około 90% tkanki miejskiej. Wraz z nastaniem pokoju na terenie Europy wyraźnie odnotować można było zwiększenie migracji ludności do miast. W Polsce zjawisko to wynikało z chęci poprawy warunków życia. Powojenne miasta jednak nie spełniały podstawowych warunków społecznych, których potrzebowali mieszkańcy i migranci. Dlatego też koniecznym stało się opracowanie zarówno planów odbudowy przedwojennych struktur miejskich, jak również zaprojektowanie nowych przestrzeni mieszkaniowych, które z upływem czasu nabrały charakteru osiedli robotniczych. Wdrożony system budownictwa modułowego opracowany został w postaci zróżnicowanych form projektowych, lecz idea rozwiązania pozostała ta sama. Najważniejsze założenia przyświecające powyższemu programowi to: krótki czas wykonania poszczególnych jednostek mieszkalnych oraz duża liczba budynków na terenach podmiejskich. Głównymi elementami, które stanowiły przeszkodę dla rozwiązań architektoniczno- przestrzennych była ich schematyczność jak i powtarzalność [1]: „Jeżeli chodzi o kompozycje zespołów osiedli, to okres lat 1951-1953 a nawet 1954 przypada największe natężenie mody na zawartość i obrzeżność zabudowy, która spowodowała nieliczenie się z potrzebami przewietrzania wewnątrz bloków, nadmierne zagęszczanie zabudowy pozbawiające mieszkańców terenów wypoczynku w pobliżu mieszkania, bagatelizowanie sprawy nasświetlenia i nasłonecznienia zarówno mieszkań, jak i terenów śródblokowych itd. Przekroczenie wskaźników procentu zabudowy uważane było za osiągnięcie, a nie za błąd. Opisywany proceder rozpoczęty w latach pięćdziesiątych, trwał praktycznie do końca lat osiemdziesiątych”. Pozostałość tych rozwiązań scharakteryzować można jako szeroko rozwinięte przestrzenie mieszkaniowe przeznaczone dla prawie 12 milionów mieszkańców, o zróżnicowanym położeniu zależnym od zapotrzebowania.

## 2. Możliwości rewitalizacji wielkopłytywowej tkanki miejskiej

Obecnie coraz częściej pojawia się na forum publicznym opinia, że rzetelny proces rewitalizacji wielkopłytywowej tkanki miejskiej jest czymś koniecznym. Liczne audyty i ekspertyzy konstrukcyjne jedynie to potwierdzają. Przeprowadzone przez grono naukowców badania przeprowadzone na terenie Osiedla Piastowskiego w Poznaniu podkreślają wyraźnie fakt, że zastana struktura wytrzyma jeszcze około 150 lat [2]. Uwzględniając przedstawione idee, szerokie grono architektów i urbanistów skłania się do podjęcia wyzwania opracowania nowoczesnego programu rewitalizacyjnego. Program ten miałby się opierać na ścisłej



współpracy projektantów oraz organów administracyjnych z mieszkańcami. Działania mające na celu ochronę modułowej tkanki osiedlowej wdrażane były podczas współpracy mieszkańców z organami administracyjnymi w trakcie sporządzania miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego<sup>2</sup>. Akt prawa miejscowego w sposób nieprzekraczalny definiuje przestrzeń wewnątrzosiedlową. Założenia dokumentu chronią stan zastany pod względem architektoniczno-urbanistycznym. Idea programu przedstawia także liczne założenia związane z rozwojem osiedla w postaci obiektów rekreacji indywidualnej oraz małej architektury w postaci ławek, koszy na śmieci, itp. Jednakże w dokumencie nie ma mowy o działaniach naprawczych nakreślonych dla poszczególnych jednostek mieszkalnych. Jedyne fragmenty poruszające kwestie modernizacji dotyczą wyłącznie elementów zewnętrznych sieci, które związane są z obsługą techniczną budynku. Nieuwzględnienie szczegółowych możliwości modernizacyjnych przekreśla w dużej mierze szanse poprawy wizerunku miejskiego zastanej przestrzeni. Przeprowadzone autorskie badanie w sposób klarowny ukazuje zaangażowanie mieszkańców w proces rewitalizacji (rys. 1.).



Rys. 1. Wykres ilustrujący aprobatę mieszkańców Os. Piastowskiego wobec wdrożenia planu rewitalizacji

Fig. 1. Diagram showing the approval of Os. Piastowskiego residents for the implementation of the revitalization plan

W ostatnim czasie zauważyć można liczne zabiegi związane z ponownym wykorzystaniem zdegradowanego potencjału mieszkaniowego. Opracowanie tego typu koncepcji przyczyniłoby się do rozwiązania licznych problemów socjologicznych, a także w sposób znaczny poprawiłoby wizerunek miejski. Rozwiązania powszechnie stosowane przez naszych zachodnich sąsiadów mogą stać się dla nas pewną bazą doświadczeń. Proces rehabilitacji zabudowy mieszkaniowej z drugiej połowy XX wieku uwzględniałby podstawowe czynniki, które

<sup>2</sup> Treść uchwały opracowanej dla Osiedla Piastowskiego, pochodząca ze strony Miejskiej Pracowni Urbanistycznej w Poznaniu

są obecnie najczęściej poruszane przez lokatorów i zarząd administracyjny. Do głównych postulatów należą m. in.:

- zwiększenie funkcjonalności wewnętrznego układu lokalowego,
- korekta zewnętrznej estetyki jednostek mieszkalnych,
- wprowadzenie elementów nowoczesnych technologii,
- zwiększenie atrakcyjności terenów zielonych.

Wzrost znaczenia funkcjonalności wewnętrznych układów mieszkaniowych [3] należy rozumieć jako wprowadzenie programu dwupoziomowych lokali. Do 1967 roku budynki tworzone z wykorzystaniem technologii konstrukcji zamkniętej. Potem jednak większość obiektów typu OWT-67 oraz W-70 posiada otwartą konstrukcję umożliwiającą ingerencję w wewnętrzny układ. Proponowany dwupoziomowy układ zaobserwować można w istniejących już budynkach pochodzących z XX wieku. Takie rozwiązanie występuje między innymi w Jednostce Marsylskiej<sup>3</sup>, zaprojektowanej przez Le Corbusiera jako tzw. maszyna do mieszkania. Idea dwukondygnacyjnych lokali opracowana została w tym przypadku wg. pierwotnego projektu, lecz uzyskanie podobnych efektów w polskich realiach pozwoliłoby osiągnąć zamierzony poziom innowacyjności. Opisując stagnację powyższych układów wielorodzinnych nie sposób nie wspomnieć o ich estetyce zewnętrznej, a także nagminnie postępującym procesie „pastelozoy”. Wprowadzenie oryginalnej, nieco bardziej stonowanej estetyki elewacji przyczyniłoby się do poprawy wizerunku modułowych osiedli. Powiązanie elewacji z możliwościami, które daje nowoczesna technologia, może być ku temu doskonałą okazją. Przeznaczenie górnej płaszczyzny obiektu pod realizację zielonych dachów pozwoli nadać miejscu swoistą markę, tzw. „brandscape” [4]. Wykreowanie nowej marki miejsca pozwoliłoby w sposób definitywny odseparować się od pastelowego układu, a dzięki powszechności wielkiej płyty istnieje szansa na stworzenie serii oryginalnych założeń.

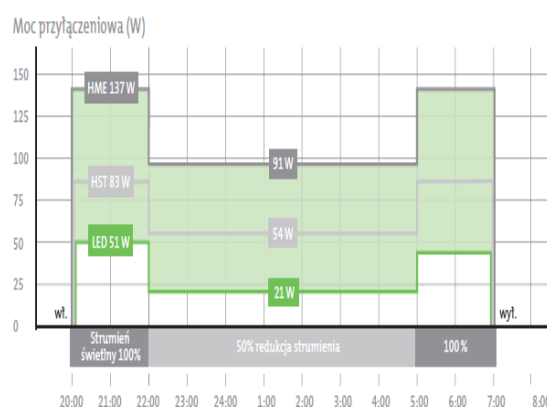
### 3. Modernizacja z uwzględnieniem nowoczesnych technologii

Podczas procesu rewitalizacji należałoby rozpatrzyć zastosowanie nowoczesnych technologii w kwestii zewnątrz oraz wnętrza zastanej struktury. Mianowicie mowa tutaj o wdrożeniu ujednoczonego planu, który działałby na dwóch płaszczyznach. Jeżeli chodzi o układ zewnętrzny istotnym elementem jest doświetlenie przestrzeni wspólnych, czyli ciągów komunikacyjnych, placów, itp. Obecnie zastosowane oprawy oświetleniowe w postaci lamp sodowych są bardzo wydajne, lecz charakteryzują się przede wszystkim dużym poborem mocy. Mimo wszystko, wymiana wspomnianych opraw na oświetlenie typu

---

<sup>3</sup> Unité d'Habitation, czyli Jednostka Marsylska: modernistyczny budynek o charakterze zabudowy wielorodzinnej zaprojektowanej przez Le Corbusiera. Samowystarczalny budynek, dzięki idei architekta posiadający dostęp do sieci usługowej oraz rekreacyjnej, które zlokalizowane są wewnątrz

LED pozwoliłoby na oszczędzenie środków, które z powodzeniem można byłoby przeznaczyć na inne cele, np. modernizację zielonych struktur wewnątrzosiedlowych. Przewidywane oszczędności obrazuje rys. 2. Opisywane przedsięwzięcie jest powszechnie stosowane w wielu aglomeracjach miejskich. Zabieg jest kosztowny, lecz wyniki stopy zwrotu zainwestowanych funduszy są niezwykle zadowalające.



Rys. 2. Zestawienie zużycia pobieranej mocy przez standardowe oprawy oświetleniowe, a także oprawy typu LED, na podstawie [5]

Fig. 2. Comparison of power consumption from standard lighting fixtures and LED lights, based on [5]

Kolejnym ważnym krokiem ku modernizacji jest należyte wykorzystanie zewnętrznych elewacji poszczególnych jednostek mieszkalnych [6]. Jedną z możliwości jest wprowadzenie do obiektów aparatury służącej do pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych. Podobne zabiegi dostrzec można w wielu krajach zachodnich. Ze względu na powszechne, jednolite zastosowanie, cieszą się one dużą aprobatą ze strony użytkowników. Mowa tutaj o wykorzystaniu elewacji do montażu ogniw fotowoltaicznych lub kolektorów słonecznych (rys. 3.). W przypadku wspomnianego już Osiedla Piastowskiego w Poznaniu, jednostki mieszkalne o wysokości 16 kondygnacji, posiadają ściany boczne od strony południowego zachodu, a więc w sposób bardzo korzystny jeśli chodzi o pobór energii słonecznej. Zastosowanie tego typu rozwiązania pozwoliłoby na pozyskanie nadwyżki energii, która mogłaby posłużyć do oświetlenia np. wewnętrznych przestrzeni wspólnych. Zastosowanie kolektorów słonecznych umożliwiłoby zaopatrzenie w bieżącą ciepłą wodę całego budynku, dzięki czemu zabieg przyczyniłby się nie tylko do zaoszczędzenia pieniędzy, ale pomógłby również zredukować emisję CO<sub>2</sub>.



Rys. 3. Przykład zastosowywania ogniw na zewnętrznych elewacjach budynków, na podstawie [7]

Fig. 3. Example of photovoltaic cells on the outer facades of buildings, based on [7]

Poruszając zagadnienie energetyki cieplnej należy wspomnieć o założeniach mających na celu zwiększenie oszczędności oraz maksymalizację potencjału budynku. Mowa tutaj o pozyskiwaniu energii cieplnej z urządzeń związanych z obsługą serwerów oraz przekazywaniu wspomnianej nadwyżki ciepłej do ogrzewania poszczególnych przestrzeni budynku (rys. 4.). Takie rozwiązanie zostało już wdrożone w wielu polskich realizacjach, m. in. w Starym Browarze i PCSS w Poznaniu. Zwiększenie wykorzystania dolnych przestrzeni obiektów wielopłytowych pozwoliłoby zlokalizować w poszczególnych dolnych partiach sieć serwerów obsługująca nie tylko wskazane jednostki mieszkalne, lecz i wybrane fragmenty miasta. Obecnie wielu dostawców mediów boryka się z problemem braku lokalizacji aparatury, dlatego też realizacja tego projektu pozwoliłaby uzyskać obopólne korzyści dla mieszkańców i dostawców. Poruszając kwestie energetyczne wymienić należy także inne systemy pozyskiwania energii. Adekwatnym przykładem jest system windy OTIS Gen2 Switch Regen, dzięki któremu możliwe jest odzyskanie sporej ilości energii podczas ruchu opadającej kabiny windowej. Rozwiązanie zastosowane będzie w tzw. Miejskim Budynku Jutra, realizowanego na warszawskim Żoliborzu. Obiekt budowlany został zaprojektowany jako demonstracyjny według zasad budownictwa ekologicznego [9].



Rys. 4. Superkomputer „Orzeł”, zlokalizowany w PCSS w Poznaniu, z którego uzyskiwana nadwyżka ciepła przekazywana jest do ogrzewania budynku, na podstawie [8]

Fig. 4. The "Orzeł" ("Eagle") supercomputer, located in PSNC in Poznań; the excess heat from it is used to heat the building, based on [8]

#### 4. Wnioski

Opisując powyższe koncepcje dostrzec można wiele możliwości, które niosą nowoczesne technologie. Ich zastosowanie jest jednak w wielu przypadkach kosztowne. Postęp technologiczny wiąże się z niebywałymi możliwościami, które w sposób znaczny mogą ułatwić życie mieszkańcom, jak również wpłynąć na zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych. Rozwój zdegradowanych struktur budownictwa modułowego za pomocą innowacji technologicznych pozwoli zmodernizować budownictwo rynku wtórnego, dzięki czemu wielka płyta może ponownie stać się obiektem marzeń oraz konkurować z nowopowstałymi obiektami.

#### Literatura

- [1] Nadolny A., Sobczyńska- Jeżewska K., Projekty poznańskich osiedli z lat 1945-1989 a ich obecny kształt, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011, s. 12-19.
- [2] Rozwadowska A., Wielka płyta postoji jeszcze 150 lat, Głos Wielkopolski, Poznań 2013.
- [3] Gronostajska B., Kreacja i modernizacja przestrzeni mieszkaniowej, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007, s. 183-194.
- [4] Bonenberg W., Architektura jako marka miasta- na przykładzie aglomeracji poznańskiej, Czasopismo Techniczne, Kraków 2012.
- [5] <http://docplayer.pl/9115403-Oswietlenie-przestrzeni-miejskiej.html> {dostęp 03.05.2016 r.}.
- [6] Chmielewski J., Mirecka M., Modernizacja osiedli mieszkaniowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007, s. 197-269.
- [7] <http://www.rynekinstalacyjny.pl/aktualnosc/id6443,kolektory-powietrzne> {dostęp 10.04.2016 r.}.

[8] <http://www.telix.pl/artykul.php?sid=71922> {dostęp 15.03.2016 r.}.

[9] [http://www.muratorplus.pl/inwestycje/inwestycje-mieszkaniowe/krasinskiego-41-fort-development-bduje-na-warszawskim-zoliborzu-miejski-budynek-jutra-2030\\_80075.html](http://www.muratorplus.pl/inwestycje/inwestycje-mieszkaniowe/krasinskiego-41-fort-development-bduje-na-warszawskim-zoliborzu-miejski-budynek-jutra-2030_80075.html) {dostęp 08.06.2016 r.}.

## **PRACTICAL APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGIES IN THE PROCESS OF URBAN REVITALIZATION OF LARGE-PANEL URBAN FABRIC, BASED ON THE EXAMPLE OF OSIEDLE PIASTOWSKIE IN POZNAN**

### **S u m m a r y**

In recent years, designers of new residential buildings have been fighting for the expansion of eco-friendly solutions. The process described is intended to improve living standards and the state of the environment. There is great potential in the dense urban fabric, especially in the large-panel buildings, that has been completely ignored in recent years. The free spaces between residential units are currently filled out with elements of modern architecture. This process has a detrimental influence on the look of the structures. The large-panel urban fabric revitalization program should be preceded by a number of social consultations along with the possible implementation of modern technologies. Similar initiatives are widespread in countries to the West of Poland. The implementation of the proposed changes should occur in a steady manner to ensure sustainable development. Changing our way of thinking about modular spaces is a crucial step towards the implementation of the ideas presented in the projects. Thanks to them, the large-plate building, seemingly a relic of the past, can become something more than simply a temporary place of residence. The modular architecture of the 20<sup>th</sup> century offers many interesting solutions through its simplicity - solutions that were quite innovative for their time. Sadly, over the years its looks has deteriorated significantly. Implementing modern technologies to the buildings may become a chance for development for specific areas and units. Increasing functionality, repairing the building's image, and a greater emphasis on eco-friendliness are widely considered to be crucial guidelines, integral to providing a thorough and comprehensive revitalization process. The proposed tenets will not only help improve the spatial appearance, but also solve many sociological problems.

**Keywords:** multifamily housing complexes, rehabilitation of modernist buildings, innovation, functionality

*Przesłano do redakcji: 23.05.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 15.09.2017 r.*

Galina KALDA<sup>1</sup>  
Karolina KWAŚNIAK<sup>2</sup>  
Julia SOKOLAN<sup>3</sup>

## ANALIZA ŹRÓDEŁ ZANIECZYSZCZENIA MIASTA RZESZOWA

W artykule prezentowano analizę takich źródeł zanieczyszczenia miasta Rzeszowa, jak zakłady przemysłowe i komunalne, które są źródłami zanieczyszczenia wód powierzchniowych i podziemnych miasta Rzeszowa. Także przeanalizowano zanieczyszczenie gleby miasta, powietrza i środowiska źródłami hałasu. Rozwój gospodarczy miasta Rzeszowa, a przede wszystkim wzrost produkcji przemysłowej oraz procesy urbanizacyjne stwarzają poważne zagrożenie dla zasobów wód powierzchniowych i podziemnych, powietrza i gleby. Pokazano, że zawartości poszczególnych substancji i metali ciężkich w wymienionych jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie nie przekraczają wartości normatywnych. Do najbardziej rozpowszechnionych zanieczyszczeń gleby Rzeszowa można zaliczyć metale ciężkie (np. ołów, rtęć, miedź, kadm); związki organiczne (pestycydy); sole siarczany, azotany, chlorki. Do głównych źródeł emisji zanieczyszczeń antropogenicznych do gleby na terenie Rzeszowa zalicza się procesy produkcyjne w zakładach przemysłowych; procesy spalania paliw na cele energetyczne i transport. Na stan powietrza w Rzeszowie wpływa przede wszystkim emisja liniowa i powierzchniowa. Sektor komunalno-bytowy w dużej mierze odpowiada za zwiększone stężenia pyłu zawieszonego oraz benzo(a)pirenu w sezonie grzewczym. Stosowane w gospodarstwach domowych niskosprawne urządzenia i instalacje kotłowe, ich zły stan techniczny, nieprawidłowa eksploatacja, a także spalanie złej jakości paliw i odpadów komunalnych są główną przyczyną tzw. niskiej emisji. Największe przekroczenia dopuszczalnych poziomów hałasu można zaobserwować na obszarach sąsiadujących z drogami krajowymi, drogą wojewódzką, a także w centrum miasta, czyli w miejscach, gdzie odbywa się największy ruch pojazdów.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenia, woda, powietrze, gleba, hałas

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Galina Kalda, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12, tel. +48 17 8651068, kaldagal@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Karolina Kwaśniak, Firma Aldesa Construcciones Polska Sp. z o.o.

<sup>3</sup> Julia Sokolan, Chmielnicki Narodowy Uniwersytet, Ukraina

## 1. Wprowadzenie

Środowisko jest nieograniczonym otoczeniem wraz z jego elementami przyrodniczymi, takimi jak: powierzchnia ziemi, wody, powietrze, klimat, krajobraz i inne elementy różnorodności biologicznej. Są to również elementy przekształcone w skutek działalności człowieka, jak np. infrastruktura osadnicza, przemysłowa oraz rolna. Wszystkie te elementy są ze sobą ściśle związane i otaczają organizmy żywe.

Rozwój gospodarczy miasta Rzeszowa, a przede wszystkim wzrost produkcji przemysłowej oraz procesy urbanizacyjne stwarzają poważne zagrożenie dla zasobów wód powierzchniowych i podziemnych, powietrza i gleby. Celem pracy jest analiza zanieczyszczeń środowiska miasta Rzeszowa różnymi źródłami przemysłowymi i komunalnymi.

## 2. Zanieczyszczenie wód w mieście Rzeszów

Rozwój gospodarczy miasta, a przede wszystkim wzrost produkcji przemysłowej oraz procesy urbanizacyjne stwarzają poważne zagrożenie dla zasobów wód powierzchniowych. Obecnie o jakości istniejących wód powierzchniowych decydują zanieczyszczenia, które przedostają się głównie z powietrza i ścieków.

Zanieczyszczenia mogą pochodzić z domieszek zawartych w wodach podziemnych i powierzchniowych (są to zanieczyszczenia naturalne) lub mogą być związane z działalnością oraz bytowaniem człowieka (zanieczyszczenia sztuczne antropogeniczne).

Zanieczyszczenia liniowe tworzą związki ropopochodne, które pochodzą z wycieków z nieszczelnych instalacji samochodowych lub kolejowych oraz wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) powstające w wyniku ścierania się opon [1]. Zagrożeniem zanieczyszczenia liniowego dla rzeszowskich wód jest dobrze rozwinięta sieć komunikacyjna. Miasto Rzeszów tworzy bardzo ważny węzeł komunikacyjny, gdzie krzyżują się trakty drogowe biegnące z północy na południe i ze wschodu na zachód oraz przebiega przez nie szlak kolejowy na Ukrainę. Obecnie w granicach miasta znajdują się 2 stacje kolejowe: Rzeszów Główny oraz Rzeszów Staroniwa, a także 3 przystanki osobowe: Rzeszów Załęże, Rzeszów Osiedle, Rzeszów Zwiączyca.

Zanieczyszczenia obszarowe pochodzą przede wszystkim z sektora rolniczego. Zanieczyszczeniami rolniczymi są pestycydy, substancje ropopochodne i związki biogenne zawarte w różnych nawozach mineralnych. Na obrzeżach Rzeszowa znajdują się tereny użytkowane rolniczo. Są to grunty orne i strefy upraw mieszanych, które podczas nieprawidłowego użytkowania zanieczyszczają wody znajdujące się w najbliższym otoczeniu. Według danych z Urzędu Statystycznego na terenie Rzeszowa znajduje się 6,9 tys. ha użytków rolnych, z czego 4,9 tys. ha stanowią grunty orne.

W Rzeszowie odbiornikiem oczyszczonych ścieków zarówno komunalnych jak i przemysłowych jest Wisłok. Bardzo duży wpływ na stan wody powierzch-



niowej mają ścieki komunalne, które w Rzeszowie stwarzają największy problem. Mieszkańcy Rzeszowa wraz z częścią sąsiadujących gmin dziennie wytwarzają ok. 40 tys. m<sup>3</sup> ścieków komunalnych, które trafiają do miejskiej oczyszczalni ścieków mechaniczno-biologicznej na Załężu. Maksymalna przepustowość tej oczyszczalni wynosi 75 tys. m<sup>3</sup>/d.

Do ważniejszych źródeł zanieczyszczeń przemysłowych rzeki Wisłok na obszarze całego miasta można zaliczyć emisję ścieków z biologicznej oczyszczalni spółki Alima Gerber S.A. Ścieki wytwarzane w fabryce Gerber pochodzą głównie z przetwórstwa owocowo – warzywnego i trafiają do przyzakładowej oczyszczalni ścieków o przepustowości 4800 m<sup>3</sup>/d.

W Rzeszowie istnieje sześć oczyszczalni ścieków przemysłowych (zlokalizowanych przy zakładach przemysłowych), których łączna przepustowość wynosi nieco ponad 13 tys. m<sup>3</sup>/d, co stanowi ok. 17 % ścieków komunalnych.

Do największych zakładów przemysłowych zlokalizowanych na terenie miasta Rzeszowa należą m.in.: WSK PZL – Rzeszów – odpady poneutralizujące, które zawierają chloroetylen, szlamy z obróbki stopów chloroniklowych, zużyte oleje, uwodnione osady cyjanogalwaniczne; ZELMER – osady pochodzące z neutralizacji ścieków pogalwanicznych, oleje przepracowane, zestalone farby i lakiery; ICN Polfa Rzeszów – odpady pochodzące z syntezy substancji farmaceutycznych, m.in. chlorek sodu i spirytus etylowy, przeterminowane substancje toksyczne, sorbenty, zużyte oleje smarowe pochodzące z urządzeń i maszyn [2-5].

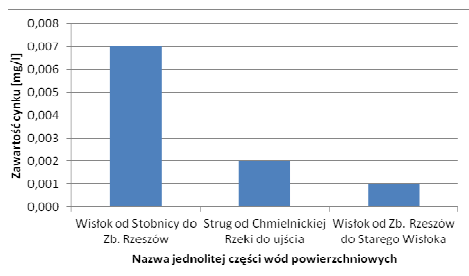
Większość wymienionych odpadów jest odbierana i unieszkodliwiana przez specjalistyczne firmy m.in. przez FHU EKO – TOP w Rzeszowie [6,7].

Na rysunkach 1-6 przedstawiono zawartość wybranych zanieczyszczeń znajdujących się w największych jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie w 2015 roku.

W 2015 r. zawartość cynku w JCWP Wisłok od Stobnicy do Zbiornika Rzeszów wynosiła 0,007 mg/l. Jest to największa wartość w porównaniu z JCWP Strug od Chmielnickiej Rzeki do ujścia oraz JCWP Wisłok od Zbiornika Rzeszów do Starego Wisłoka.

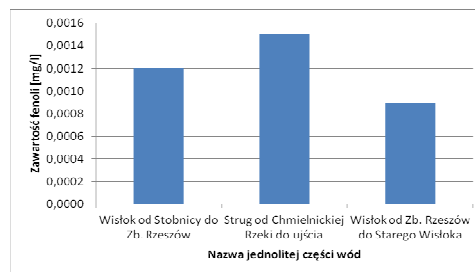
Najmniejszą zawartość cynku zaobserwowano w JCWP Wisłok od Zbiornika Rzeszów do Starego Wisłoka, która wyniosła 0,001 mg/l. Żadna z przedstawionych wartości nie przekracza zakresu normatywnego (wynoszącego maksymalnie 1 mg/l), dlatego nie stwarzają one realnego zagrożenia tych jednolitych części wód.

Największą zawartość fenoli stwierdzono w jednolitej części wód powierzchniowych Strug od Chmielnickiej Rzeki do ujścia. Wartość ta była równa 0,0015 mg/l. Świadczy to o tym, że JCWP Strug od Chmielnickiej Rzeki do ujścia była najbardziej zanieczyszczona przez ten związek. Na terenie tej JCWP swoją działalność przemysłową prowadzą zakłady, takie jak np. METALFORM w Chmielniku (przetwórstwo tworzyw metalowych i sztucznych) oraz Przedsiębiorstwo Produkcji, Handlu i Usług H – GAZ Spółka Jawna w Tyczynie (produkcja stacji gazowych, filtrów, zestawów montażowych turbinowych). Zakłady te produkują duże ilości ścieków oraz odpadów, które zawierają zwiększone ilości fenoli.



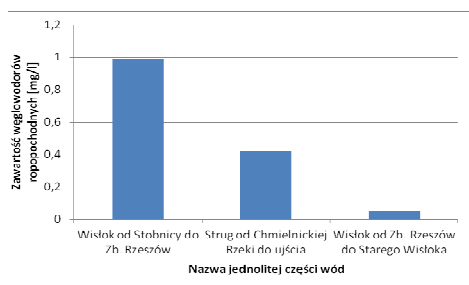
Rys. 1. Zawartość cynku w jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie w 2015 r., na podstawie [7]

Fig. 1. Zinc content in the listed uniform parts of surface waters in Rzeszow in 2015, based on [7]



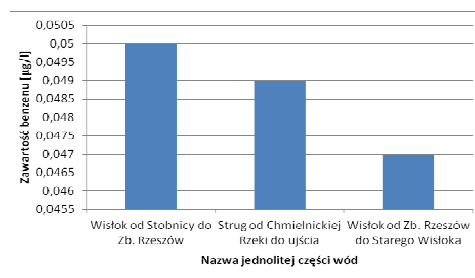
Rys. 2. Zawartość fenoli w jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie w 2015 r., na podstawie [7]

Fig. 2. Phenols content in the listed uniform parts of surface waters in Rzeszow in 2015, based on [7]



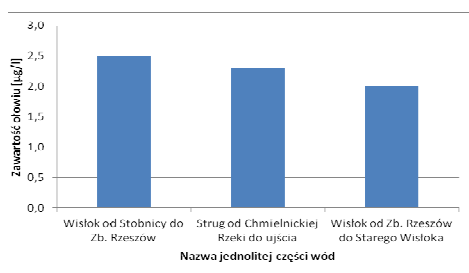
Rys. 3. Zawartość węglowodorów ropopochodnych w jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie w 2015 r., na podstawie [7]

Fig. 3. Petroleum hydrocarbons content in the listed uniform parts of surface waters in Rzeszow in 2015, based on [4]



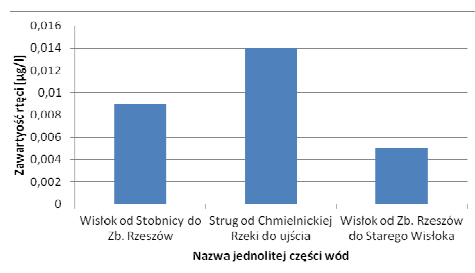
Rys. 4. Zawartość benzenu w jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie w 2015 r., na podstawie [7]

Fig. 4. Benzene content in the listed uniform parts of surface waters in Rzeszow in 2015, based on [7]



Rys. 5. Zawartość ołowiu w jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie w 2015 r., na podstawie [7]

Fig. 5. Lead content in the listed uniform parts of surface waters in Rzeszow in 2015, based on [7]



Rys. 6. Zawartość rtęci w jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie w 2015 r., na podstawie [7]

Fig. 6. Mercury content in the listed uniform parts of surface waters in Rzeszow in 2015, based on [7]

W 2015 r. największa zawartość węglowodorów ropopochodnych wystąpiła w jednolitej części wód powierzchniowych Wisłok od Stobnicy do Zbiornika Rzeszów. Wartość ta była bliska 1 mg/l.

Na terenie JCWP Wisłok od Stobnicy do Zbiornika Rzeszów znajdują się następujące zakłady: STELMET Sp. z.o.o. Cynkownia w Czudcu, ART-GUM w Czudcu, AT-BI w Budziwoju, Instytut Energetyki Oddział Ceramiki CEREL w Boguchwale. Działalność wymienionych zakładów przyczynia się do zwiększonych ilości węglowodorów ropopochodnych w jednolitej części wód powierzchniowych Wisłok od Stobnicy do Zbiornika Rzeszów.

Rys. 4 pokazuje, że zawartość benzenu w wymienionych jednolitych częściach wód powierzchniowych jest porównywalna. Wszystkie mieszczą się w zakresie 0,047-0,05 µg/l. Największa ilość benzenu wystąpiła w jednolitej części wód Wisłok od Stobnicy do Zbiornika Rzeszów, natomiast najmniejsza w JCWP Wisłok od Zbiornika Rzeszów do Starego Wisłoka. Przedstawione wartości nie przekraczają określonego zakresu normatywnego.

W 2015 r. największa zawartość ołowiu wyniosła 2,5 µg/l i wystąpiła w JCWP Wisłok od Stobnicy do Zbiornika Rzeszów. Decydujący wpływ na wielkość zawartości ołowiu w tej JCWP ma zakład STELMET Sp. z.o.o. Cynkownia w miejscowości Czudec. W pozostałych jednolitych częściach wód wartości były nieco niższe i nie mają znaczącego wpływu na zanieczyszczenie wód. Zawartość ołowiu w wymienionych jednolitych częściach wód powierzchniowych nie przekracza zakresu normatywnego.

Z rys. 6 można odczytać, że w 2015 r. największa zawartość rtęci wystąpiła w JCWP Strug od Chmielnickiej Rzeki do ujścia. Było to spowodowane działalnością Zakładu Produkcyjno-Handlowo-Usługowego JAR s.c. w Kielnarowej, gdzie wytwarzane są różne wyroby betonowe.

Najmniejszą ilość rtęci zaobserwowano w JCWP Wisłok od Zbiornika Rzeszów do Starego Wisłoka, która była równa 0,005 µg/l. Żadne z przedstawionych wartości rtęci w wodach nie wykracza poza zakres normatywny.

Analizując rysunki 1-6, można stwierdzić, że zawartości poszczególnych substancji i metali ciężkich w wymienionych jednolitych częściach wód powierzchniowych w Rzeszowie nie przekraczają wartości normatywnych. W 2015 roku największą ilość zanieczyszczeń zaobserwowano w JCWP Wisłok od Stobnicy do Zbiornika Rzeszów. Największym problemem JCWP jest zwiększona ilość węglowodorów ropopochodnych, czego przyczyną są znajdujące się na tym obszarze zakłady przemysłowe.

### 3. Zanieczyszczenie gleb w Rzeszowie

Gleby występujące na obszarze Rzeszowa - to gleby mineralne, które zostały wytworzone z utworów aluwialnych w dolinie Wisłoka oraz z utworów lessowych (pyłów, glin pylastych) na wysoczyźnie Podgórze Rzeszowskiego. Z utworów pochodzenia aluwialnego wytworzyły się gleby typu: mady, gleby brunatne oraz

czarnoziemy zdegradowane, natomiast z utworów pyłowych - czarnoziemy, gleby brunatne kwaśne, brunatne wyługowane oraz lokalne bielice.

Zanieczyszczenie gleby stanowią wszelkie związki chemiczne, pierwiastki promieniotwórcze oraz mikroorganizmy występujące w glebach w zwiększonych ilościach. Do najbardziej rozpowszechnionych zanieczyszczeń można zaliczyć: metale ciężkie (np. ołów, rtęć, miedź, kadm); związki organiczne (pestycydy, detergenty); sole (siarczany, azotany, chlorki) [7].

Do głównych źródeł emisji zanieczyszczeń antropogenicznych do gleby na terenie Rzeszowa zalicza się:

- procesy produkcyjne w zakładach przemysłowych;
- procesy spalania paliw na cele energetyczne;
- transport.

W tabeli 1 przedstawiono źródła zanieczyszczenia gleb, występujące na terenie miasta Rzeszów oraz rodzaje zanieczyszczeń, które emitowane są przez dane źródło.

Tabela 1. Wykaz substancji powodujących zanieczyszczenie gleb w Rzeszowie, na podstawie [7]

Table 1. The list of substances causes soil contamination In Rzeszow, based on [7]

Źródła zanieczyszczeń	Rodzaje zanieczyszczeń
Elektrociepłownie, elektrociepłownie konwencjonalne, instalacje do spalania, np. PGE GiEK Elektrociepłownia Rzeszów, Fenice Poland	Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), metale ciężkie
Zakłady tworzyw sztucznych, np. Zakład Tworzyw Sztucznych Lemar (systemy rynnowe, drenarskie, kanalizacyjne), PoliMarky (tworzywa sztuczne, systemy instalacyjne), Polkemic (produkcja obrzeży i profili meblowych)	Fenole, węglowodory chlorowane, cykloheksan, ftalany
Zakłady produkcji farb, lakierów i rozpuszczalników, np. Firma Produkcyjno – Handlowa Kolorex (produkcja chemii budowlanej oraz wykładzin PCV)	Węglowodory aromatyczne i chlorowane, cynk, chrom, ołów, bar
Galwanizernie, np. WSK Rzeszów (wytwórnia sprzętu komunikacyjnego i zakład metalurgiczny)	Metale ciężkie, cyjanki
Zakłady produkcji silników, zakłady naprawy i produkcji środków transportu, np. WSK Państwowe Zakłady Lotnicze–Rzeszów (wytwórnia silników lotniczych)	WWA, węglowodory alifatyczne, metale ciężkie
Stacje paliw, stacje obsługi pojazdów, parkingi, np. Multimoto (Okręgowa Stacja Kontroli Pojazdów)	Węglowodory alifatyczne, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, benzyny
Spalarnie odpadów (planowana jest budowa spalarni odpadów komunalnych oraz komunalnych osadów ściekowych przy Elektrociepłowni Rzeszów, przewidziany czas oddania do eksploatacji rok 2019–2020)	Metale ciężkie, WWA

Innym zagrożeniem dla środowiska glebowego jest stosowanie osadów ściekowych w sposób niekontrolowany. Wykorzystanie komunalnych osadów ściekowych pozwala na wprowadzenie do gleby składników nawozowych, które są zawarte w osadach. Częściowo rozwiązuje to problem utylizacji osadów, jednak ich skład chemiczny, a przede wszystkim znaczna zawartość pierwiastków śladowych, azotu i fosforu stwarza poważne zagrożenie dla środowiska przyrodniczego. Zanim osad zostanie zastosowany na danym obszarze, wcześniej należy zbadać glebę pod względem poziomu jej zakwaszenia oraz zawartości metali ciężkich. Stosowanie osadów nie jest dopuszczalne w przypadku, gdy gleba posiada odczyn niższy od pH 5,6 i przekracza dopuszczalne stężenie metali ciężkich. Mogłoby to spowodować skażenie gleby i wody gruntowej metalami ciężkimi, azotem oraz fosforem [7].

#### 4. Zanieczyszczenie powietrza w Rzeszowie

Położenie Rzeszowa w dolinie Wisłoka, czyli we wklęsłej formie terenowej, określa niektóre cechy jego naturalnego klimatu, do których należy zaliczyć m.in. tworzenie zastoisk zimnego powietrza oraz częste inwersje temperatury, większą ilość cisz atmosferycznych i słabych wiatrów, większą ilość dni z mrozem i przymrozkiem, a także zwiększoną ilość dni z mgłą. Ruch powietrza na obszarze Rzeszowa jest zdominowany napływem z kierunków wschodniego i zachodniego, a także modyfikującą rolą doliny rzeki Wisłok i gór [8].

W Rzeszowie przy ul. Rejtana (osiedle Nowe Miasto) znajduje się stacja pomiarowa monitoringu jakości powietrza. Parametry mierzone na stacji to: obecność dwutlenku węgla, dwutlenku azotu, tlenku i tlenków azotu, tlenku węgla, ozonu, pyłu PM10, pył PM2.5, benzenu oraz warunków meteo (temperatura, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność, opady, siła i kierunek wiatru). W tabeli 2 został umieszczony zakres pomiarowy rzeszowskich stacji pomiarowych. Stacje mają na celu pomiar poziomu zanieczyszczeń, który dąży do oceny narażenia mieszkańców Rzeszowa na zanieczyszczenia zawarte w powietrzu.

Tabela 2. Zakres pomiarowy realizowany na stacjach w Rzeszowie, na podstawie [7]

Table 2. Measurement range realized on stations in Rzeszow, based on [7]

Lokalizacja stacji	Mierzone zanieczyszczenia								
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	O <sub>3</sub>	PM10	Metale w PM10	Benzo(a)piren w PM10
Rzeszów, ul. Rejtana	A	A	A	A	A	A	M	A/M	M

A – pomiar automatyczny, M – pomiar manualny, P – pomiar pasywny

Zanieczyszczenia powietrza stanowią ciała stałe, ciecze i gazy, które znajdują się w powietrzu atmosferycznym, jednak nie są jego naturalnymi składnikami. Mogą to być również substancje będące naturalnymi składnikami powietrza, które występują w znacznie zwiększonych ilościach.

Na stan powietrza w Rzeszowie wpływa przede wszystkim emisja liniowa i powierzchniowa. Sektor komunalno-bytowy w dużej mierze odpowiada za zwiększone stężenia pyłu zawieszonego oraz benzo(a)pirenu w sezonie grzewczym. Stosowane w gospodarstwach domowych niskosprawne urządzenia i instalacje kotłowe, ich zły stan techniczny, nieprawidłowa eksploatacja, a także spalanie złej jakości paliw i odpadów komunalnych są główną przyczyną tzw. niskiej emisji.

Komunikacja ma wpływ przede wszystkim na poziom  $\text{NO}_x$ , pyłu zawieszonego oraz benzenu. Największe stężenia wymienionych zanieczyszczeń występują na skrzyżowaniach i drogach o znacznym natężeniu ruchu, które przebiegają przez obszary położone w zwartej zabudowie. Powodem zwiększonej emisji pochodzącej ze źródeł komunikacyjnych może być zły stan techniczny pojazdów, ich nieprawidłowa eksploatacja, a także korki uliczne.

Największymi zakładami w Rzeszowie emitującymi substancje do powietrza są zakłady energetyczne i ciepłownicze, a także zakłady przemysłowe, które wymagają dużych ilości energii do procesów technologicznych. Są to m.in.: PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. Oddział Elektrociepłownia Rzeszów (pokrywa ok. 80% zapotrzebowania na moc cieplną); Fenice Poland Sp. z o.o. Jednostka Operatywna Rzeszów (pracuje na potrzeby zakładu WSK PZL–Rzeszów, pokrywa ok. 20% zapotrzebowania miasta na ciepło); ICN Polfa Rzeszów S.A. (produkuje farmaceutyki); Wytwórnia Sprzętu Komunikacyjnego PZL–Rzeszów S.A. oraz Zakład Metalurgiczny WSK Rzeszów [7].

Innymi czynnikami, które mają negatywny wpływ na jakość powietrza w Rzeszowie, są warunki klimatyczne oraz topograficzne. Położenie miasta w dolinie Wisłoka i związane z tym warunki klimatyczne są powodem niekorzystnych warunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Na dodatek lokalnie występują również specyficzne warunki klimatyczne, które związane są z zabudową miasta (m.in. kaniony uliczne) [8].

Największym problemem dla Rzeszowa jest emisja zanieczyszczeń pyłowych. Krytyczne stężenia pyłu zawieszonego  $\text{PM}_{2,5}$  oraz  $\text{PM}_{10}$ , a także benzo(a)pirenu występują w miesiącach zimowych, natomiast w okresie letnim nie zaobserwowano przekroczenia wartości tych stężeń. Odpowiedzialna jest za to głównie emisja z systemów grzewczych, ściśle związana z sektorem bytowo-komunalnym. Do lokalnych kotłowni węglowych, wytwarzających największe ilości zanieczyszczeń, należy zaliczyć następujące części miasta: teren Starówki, pomiędzy ul. Piłsudskiego, Targową, Ciepłińskiego i Lisa-Kuli; teren zwartej zabudowy pomiędzy torami PKP a ul. Piłsudskiego; dzielnicę magazynowo-składową pomiędzy torami PKP a ul. Okulickiego; zabudowę jednorodziną przy

ul. Szopena, Długosza, Tetmajerów; obrzeża miasta wraz ze starszym budownictwem jednorodzinny.

Największy udział w emisji zanieczyszczeń do powietrza mają rzeszowskie zakłady (energetyczne i ciepłownicze, a także zakłady przemysłowe). Są one uciążliwe dla całego środowiska przyrodniczego, dlatego wymagają ciągłej modernizacji i unowocześnienia, by wytwarzać mniejsze ilości zanieczyszczeń. Przykładem jest ICN Polfa Rzeszów, który dzięki modyfikacji technologii produkcji farmaceutyków ograniczył zużycie związków organicznych oraz tym samym emisję lotnych związków organicznych (LZO). W ramach modernizacji zakładu Fenice Poland Sp. z o.o. włączono do technologii odpylania kolejny elektrofiltr, a w następnych latach przewiduje się zabudowę palników niskoemisyjnych na kotłach. Natomiast PGE Elektrociepłownia planuje przeprowadzić modernizację układu odpylania kotłów WR-25.

## 5. Hałas w mieście Rzeszów

Obecnie największy wpływ na klimat akustyczny miasta Rzeszowa ma ruch drogowy. Na przestrzeni lat ulega on zwiększeniu ze względu na wzrost ilości samochodów osobowych i ciężarowych. Hałas, który oddziałuje bezpośrednio na sąsiadującą zabudowę miejską, stanowi główne źródło zagrożenia. Zasięg oraz stopień tego zagrożenia jest uzależniony od typu ulicy lub drogi i struktury rodzajowej pojazdów oraz od rodzaju zabudowy zlokalizowanej w sąsiedztwie dróg.

Sieć drogowa w Rzeszowie charakteryzuje się układem promienistym o silnym zorientowaniu w stronę centrum. Do węzła komunikacji drogowej zewnętrznej w obrębie Rzeszowa należą: droga krajowa nr 4 – międzynarodowa E-40 relacji Drezno, Zgorzelec, Wrocław, Katowice, Kraków, Rzeszów, Medyka, Lwów; droga krajowa nr 9 – międzynarodowa E-371 relacji Radom, Rzeszów, Barwinek, Koszyce; droga krajowa nr 19 – relacji Białystok, Lublin, Rzeszów – łącząca się dalej z DK 9; droga wojewódzka nr 878 – relacji Rzeszów, Dylągówka.

Do sieci drogowej miasta Rzeszów zalicza się również drogi powiatowe, drogi gminne oraz wewnętrzne.

Niewystarczająca ilość przepraw mostowych i przejść dwupoziomowych na przecięciach dróg z trasami kolejowymi, a także brak dopełnienia układów drogowych po stronie północno-wschodniej miasta w powiązaniu z szybkim rozwojem motoryzacji przyczyniły się do przekroczenia przepustowości ulic w śródmieściu, na obwodnicy śródmiejskiej oraz trasach wylotowych. Jednak najistotniejszy udział w oddziaływaniu akustycznym na terenie Rzeszowa odgrywają drogi tranzytowe, które charakteryzują się dużym natężeniem ruchu w ciągu całej doby. Poruszają się po nich pojazdy ciężkie, mające znaczny udział w poziomie emitowanego hałasu.

Na terenie Rzeszowa źródłami hałasu kolejowego są głównie dworce kolejowe i szlaki dojazdowe. Węzeł kolejowy, który obsługuje przewozy pasażerskie, tworzy linie kolejowe, takie jak: magistralna linia kolejowa E30 Wrocław, Kra-

ków, Rzeszów, Przemyśl; linia nr 71 relacji Tarnobrzeg Ocice, Rzeszów Główny, o znaczeniu krajowym; linia kolejowa nr 106 relacji Rzeszów, Jasło, o znaczeniu regionalnym.

Obecnie w najlepszym stanie technicznym jest linia kolejowa nr 71, która łączy Rzeszów Główny ze stacją Tarnobrzeg Ocice. W ostatnich latach została ona zmodernizowana. Jest to linia jednotorowa i bezстыkowa na podkładach strunobetonowych, dostosowana do prędkości 110 km/h. W skali dobowej łącznie kursują po niej cztery składy pasażerskie oraz cztery towarowe. Obecnie planowana jest elektryfikacja linii kolejowej. W gorszym stanie znajduje się magistrała kolejowa E30 relacji Medyka - Kraków Główny, jest to linia dwutorowa, zelektryfikowana. Jej stan został określony jako dostateczny o dozwolonej prędkości od 60 do 90 km/h, jednak aktualnie jest ona modernizowana i dostosowywana do maksymalnej prędkości 160 km/h. Na terenie miasta magistrała przebiega z dala od zabudowań chronionych przed hałasem. Wyjątkiem jest odcinek na północ od alei Wyzwolenia, gdzie jest zlokalizowana blisko zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej i zabudowy mieszkaniowo-usługowej, a także obszary po wschodniej stronie od stacji Rzeszów Główny w okolicy Załęża.

Linia kolejowa nr 106 relacji Rzeszów Główny – Jasło jest również modernizowana. Jednotorowa linia prowadzi mały ruch kolejowy, który nie przekracza dziesięciu składów w czasie doby. Ze względu na małe natężenie ruchu nie emituje ona hałasu, który powodowałby przekroczenie dopuszczalnego poziomu (pomimo bliskiego sąsiedztwa zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej).

W Rzeszowie głównym źródłem hałasu lotniczego są operacje związane z funkcjonowaniem portu lotniczego Rzeszów – Jasionka. Międzynarodowy port lotniczy leży w odległości 3 km od granic miasta i 10 km od śródmieścia. Port jest położony w pobliżu drogi krajowej nr 9 oraz 19.

Oddziaływanie dźwiękowe związane z działalnością przemysłową na obszarze miasta jest uwarunkowane emisją hałasu pochodzącą z zakładów przemysłowych oraz małych zakładów rzemieślniczych. Główną gałęzią przemysłu w mieście Rzeszów jest przemysł lotniczy. Rzeszów jest najważniejszym ośrodkiem stowarzyszenia przedsiębiorców Doliny Lotniczej zrzeszającej ponad 90 członków (przedsiębiorstw oraz ośrodków naukowo-badawczych z południowo-wschodniej części kraju, w tym również WSK PZL – Rzeszów). Na terenie miasta poza przemysłem lotniczym są zlokalizowane również inne branże: informatyczna, elektroniczna, produkcja sprzętu gospodarstwa domowego (Zelmer S.A.) i przetwórstwa rolno-spożywcze (Przedsiębiorstwo Produkcji Lodów Koral, Nestle Polska S.A. Oddział w Rzeszowie). Zabudowa przemysłowa znajduje się w lewobrzeżnej części miasta w rejonie ulic: Trembeckiego, Wetlińskiej, Przemysłowej, Maczka, Okulickiego, Boya – Żeleńskiego, Hoffmanowej, Siemieńskiego i Geodetów. Podmioty gospodarcze, które działają na terenie Rzeszowa, są źródłem lokalnej emisji hałasu. Zatem hałas przemysłowy nie ma znaczącego wpływu na klimat akustyczny całego miasta i jest on znacznie mniej odczuwalny niż hałas komunikacyjny.



Kolejną uciążliwą grupą oddziaływań akustycznych w odbiorze społecznym jest hałas komunalny. Jest to zazwyczaj punktowe źródło emisji, zlokalizowane we wszystkich osiedlach Rzeszowa. Oddziaływania pochodzące z barów, restauracji i klubów dominują przede wszystkim w Śródmieściu. Ponadto pawilony handlowe zlokalizowane w różnych częściach miasta również mogą być przyczyną zawyżonej emisji hałasu do środowiska. W tym przypadku źródłami hałasu są przeważnie instalacje klimatyzacyjne i wentylacyjne, a także agregaty chłodnicze nie posiadające zabezpieczeń akustycznych.

Innymi źródłami należącymi do grupy hałasu komunalnego są imprezy masowe, które odbywają się w centrum miasta. Jednak w przypadku takich imprez na organizatorach spoczywają obowiązki dotrzymania dopuszczalnych norm emisji hałasu podczas trwania imprez [9].

Badania, ocenę oraz obserwacje zmian stanu akustycznego w rzeszowskim środowisku wykonuje się w ramach Państwowego monitoringu środowiska. Wojewódzki Inspektorat Środowiska w Rzeszowie co roku realizuje zadania oparte na ocenie hałasu emitowanego ze źródeł przemysłowych oraz komunikacyjnych. Ocenę klimatu akustycznego dokonuje się uwzględniając wyniki pomiarów poziomów hałasu, które zostały określone wskaźnikami hałasu i mają zastosowanie przede wszystkim do prowadzenia długookresowej polityki związanej z ochroną środowiska przed hałasem, a w szczególności do przygotowywania map akustycznych  $L_N$  i  $L_{DWN}$ , gdzie  $L_N$  oznacza długookresowy średni poziom danego dźwięku, wyrażony w decybelach i wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy w roku; natomiast  $L_{DWN}$  oznacza długookresowy średni poziom danego dźwięku, wyrażony w decybelach i wyznaczony w ciągu wszystkich dób w roku, uwzględniając pory dnia, pory wieczoru oraz pory nocy [7,10].

W celu wykonania pomiaru hałasu komunikacyjnego przeprowadzono ćwiczenie, którego zakres obejmował pomiar hałasu komunikacyjnego przy alei Powstańców Warszawy w Rzeszowie w odległości 1 m od krawędzi jezdni na wysokości 1,2 m. Dokonano trzy pięciominutowe pomiary emisji hałasu. Ćwiczenie obejmowało również odnotowanie ilości i rodzaju pojazdów przejeżdżających mierzoną trasą. Badanie zostało przeprowadzone dwukrotnie o godz. 9:00 oraz 15:00 w dniu 18.03.2015 r.

Z wykonanych pomiarów wyznaczono równoważny poziom hałasu dla czasu odniesienia ( $L_{Aeq}$ ), poziom emisji hałasu do środowiska ( $L_e$ ) oraz parametry pozycyjne rozkładu statycznego.

Pojazdy liczone rozgraniczając je na: lekkie – osobowe do 9 miejsc z kierownicą, mikrobusy z przyczepą lub bez, lekkie samochody ciężarowe do 3,5 t z przyczepą lub bez, samochody dostawcze o masie do 3,5 t oraz pojazdy ciężkie, czyli wszystkie pozostałe pojazdy.

Tabela 3 przedstawia wyniki własnych pomiarów poziomu hałasu na drogach Rzeszowa.

Tabela 3. Wyniki pomiarów dokonanych o godz. 9 dnia 18.03.2015 r. (opracowanie własne)

Table 3. The results of the measurements made at 9 o'clock 18.03.2015 (own work)

		Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
L <sub>A1</sub>		74,5 dB	74,8 dB	75,5 dB
L <sub>10</sub>		78,8 dB	79 dB	78,1 dB
L <sub>50</sub>		68,3 dB	69,8 dB	72 dB
L <sub>90</sub>		58 dB	57,6 dB	59,6 dB
Tłó akustyczne		55,6 dB	56 dB	56,5 dB
kierunek Kraków	Pojazdy lekkie	67	72	84
	Pojazdy ciężkie	19	14	10
kierunek Przemysł	Pojazdy lekkie	64	59	57
	Pojazdy ciężkie	5	5	6

Po wykonaniu pomiarów przeprowadzono następujące obliczenia:

- średniego poziomu ciśnienia akustycznego:

$$L_{A\bar{s}r} = 74,95 \text{ dB}$$

- średniego poziomu tła akustycznego:

$$L_{t\bar{s}r} = 56,05 \text{ dB}$$

- poziomu hałasu emitowanego do środowiska:

$$L_e = 74,95 \text{ dB}$$

- równoważnego poziomu hałasu dla czasu odniesienia:

$$L_{Aeq,T} = 56,89 \text{ dB}$$

Największe przekroczenia dopuszczalnych poziomów hałasu można zaobserwować na obszarach sąsiadujących z drogami krajowymi nr 19, 9 i 4, drogą wojewódzką nr 878 (przy alei Sikorskiego), a także w centrum miasta, czyli w miejscach, gdzie odbywa się największy ruch pojazdów.

Na terenie Rzeszowa naruszenia dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku występują przy: ul. Krakowskiej i Warszawskiej (do 15 dB); ul. Witosa, Batalionów Chłopskich, Lwowskiej, Lubelskiej, Dąbrowskiego, Podkarpackiej (do 10 dB); al. Powstańców Warszawy, ul. Marszałkowskiej (do 5 dB).

## 6. Podsumowanie

Podsumują, można stwierdzić, że głównymi źródłami zanieczyszczeń gleb w Rzeszowie są procesy produkcyjne w istniejących zakładach przemysłowych, procesy spalania paliw oraz transport.

W przypadku wód podziemnych występują zwiększone ilości żelaza, które są spowodowane geogenicznym pochodzeniem tego wskaźnika. Największym zagrożeniem dla wód są ścieki odprowadzane przede wszystkim z sektora komunalnego.

Ponadnormatywne wartości benzo(a)pirenu w pyłe PM10 są skutkiem spalania paliw w celach grzewczych w gospodarstwach domowych.

Największe źródło hałasu w Rzeszowie stanowi hałas drogowy. Na podstawie własnych badań pokazano, że przekroczenia dopuszczalnych poziomów hałasu można zaobserwować na obszarach sąsiadujących z drogami krajowymi nr 4, 9 i 19, drogą wojewódzką nr 878 (przy alei Sikorskiego), a także w centrum miasta.

## Literatura

- [1] Poskrobko B., Poskrobko T., Skiba K.: Ochrona biosfery, PWN, Warszawa 2007.
- [2] Chmielowski K., Mazur R., Bedla D. i in. Analiza obciążenia hydraulicznego w oczyszczalni ścieków w Kolbuszowej Dolnej, *Episteme: Czasopismo Naukowo-Kulturalne*, vol. 1, nr 30, 2016, ss. 319-334.
- [3] Młyński D., Chmielowski K., Młyńska A. Analysis of hydraulic load of a wastewater treatment plant in Jasło, *Journal of Water and Land Development*, 2016, No. 28 (I-III), pp. 61-67.
- [4] Chmielowski K., Rajchel B., Karnas M. Content available remote Analiza skuteczności działania oczyszczalni ścieków „Kujawy”, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, 2016 z. 63, nr 2/I, pp. 31-42. DOI:10.7862/rb.2016.107.
- [5] Sipowicz W., Bachórz J., Wójcik B.: Plan gospodarki odpadami dla miasta Rzeszowa, Rzeszów 2004.
- [6] Studziński, A, Pietrucha-Urbanik, K. (2015). Preventive maintenance and reliability of water supply system elements, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, 62(3), 2005, pp. 429-436. DOI:10.7862/rb.2015.126.
- [7] Lipińska E., Kozak E., Ciba J., Rybak T., Kalisz E., Kyc H. i inni: Raporty o stanie środowiska w latach 2010-2015, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska, Rzeszów.
- [8] Chmura U. i inni: Program ochrony powietrza dla strefy miasto Rzeszów, Załącznik do Uchwały nr XLII/804/10 Sejmiku Województwa Podkarpackiego z dnia 25 stycznia 2010, Rzeszów 2010.
- [9] Bohatkiewicz J., Biernacki S., Hałucha M. i inni: Program ochrony środowiska przed hałasem, Załącznik do uchwały nr LI/976/2013 Rady Miasta Rzeszowa z dnia 23 kwietnia 2013 r., Rzeszów 2013.
- [10] Rak J., Pietrucha-Urbanik K. New directions for the protection and evolution of water supply systems - smart water supply. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, 2015, No z. 3/I, pp. 365-373. DOI:10.7862/rb.2015.121.

## THE ANALYSIS OF THE SOURCES OF CONTAMINATION THE CITY OF RZESZOW

### Summary

The article has presented analysis such sources of contamination the city of Rzeszow, as industrial plants and municipal facilities, which are source devastation surface waters and groundwater the city of Rzeszow. Also analyzed contamination of soil, air and environment the source of noise. Economy development the city of Rzeszow, but the most of all increase industrial productions and urbanization process created real danger for deposits surface waters and groundwater, air and soil. In the article presented analyzed environmental contaminations the city of Rzeszow from industrial and municipal types of sources. Shown, that the contents of individual substances and heavy metals in listed uniform parts of surface waters in Rzeszow not exceed normative values. To the most prevalent Rzeszow soil contaminants may include the heavy metals (e.g. lead, mercury, copper, cadmium); organic compounds (pesticides); salts, sulfates, nitrates, chlorides. To main sources emission of anthropogenic contamination to soil on territory of Rzeszow may include manufacturing processes in industrial plants; combustion of fuels for energy purposes and transport. For condition of air in Rzeszow depends first of all linearly and surface emission. The public utilities sector are largely response for increased concentration of particulate matter and benzo(a)pyren in heating season. Used in households low-efficiency device and boilers, their bad technical condition, incorrect exploitation and also combustion bad quality of fuels and garbage are main cause the so-called low emission. The biggest excessive norms of noise can observed on areas neighbouring with national routes, voivodeship route and also the city-center, in the other words in places, which hosts the largest traffic.

**Keywords:** contamination, waters, air, soil, noise

*Przesłano do redakcji: 15.10.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Marek GOSZTYŁA<sup>1</sup>  
Stanisław LEŚ<sup>2</sup>  
Krystian SIKORSKI<sup>3</sup>

## STARY RYNEK W RZESZOWIE – TYNKI STOSOWANE W PROCESIE RENOWACJI OBIEKTÓW ZABYTKOWYCH. ASPEKTY TECHNOLOGICZNE

Rynek jako wizytówka miast jest miejscem o istotnych walorach kulturowych, a jego stan jest odzwierciedleniem potencjału i rangi ośrodków. W związku z tym faktem, niebawem uwagę przykładają się do estetyki, najczęściej historycznej zabudowy okalającej płytę główną. Główny wpływ na stan techniczny frontowych elewacji śródmiejskich kamienic ma jakość wykonanych robót i użytych materiałów, co związane jest bezpośrednio z czteroetapowym systemem diagnozy, naprawy i użytkowania obiektu. Wspomnieć należy, iż prawidłowe rozpoznanie zależności przyczynowo skutkowej jest zagadnieniem kluczowym w przypadku właściwego wykonania prac konserwatorskich. W artykule zwrócono uwagę na celowość stosowanych pokryć elewacji na przykładzie rzeszowskiego Starego Rynku, którego zabudowa w ostatnich latach poddana została szeregowi prac związanych z poprawą istniejącego stanu technicznego. Pod rozważania poddano kilka rodzajów tynków używanych podczas wykonywania prac konserwatorskich związanych z zabezpieczeniem obiektu. Wśród nich wymienić należy tynki wapienne, cementowe, cementowo – wapienne oraz renowacyjne. Na podstawie wykonanych badań stwierdzono stan obecny obiektów referencyjnych, co pozwoliło sformułować wnioski dotyczące przydatności zastosowanych rozwiązań. Jedynie tynki renowacyjne umożliwiły spełnienie założeń projektowych, tj.: wpłynęły na obniżenie zawartości wilgoci w przegrodach. Bezsporną zaletą tynków renowacyjnych, wynikającą z ich składu oraz struktury, jest kumulowanie soli wewnątrz porów, co przekłada się na ich wysoką trwałość (nie stwierdzono odparzania lub odpajania tynku od powierzchni muru). Dodatkowo w artykule poruszono zagadnienia związane z poprawnością wykonania prac konserwatorskich oraz wpływem doboru materiałów na trwałość wykonanych pokryć elewacji.

**Słowa kluczowe:** Rzeszów, Stary Rynek, tynk renowacyjny, wilgotność, sole budowlane

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Marek Gosztyła, Politechnika Rzeszowska, Katedra Konserwacji Zabytków, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, gosztyla@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Stanisław Leś, Technolog PCI, stanislaw.les01@gmail.com

<sup>3</sup> Krystian Sikorski, doktorant WBIŚiA PRz, mr.krystian.sikorski@gmail.com

## 1. Wstęp

Każda osada ludzka posiada sieć naczyń zwanych ulicami, które prowadzą do miejsca centralnego - rynku. Funkcja rynku na przestrzeni wieków ulegała zmianom. Zawsze jednak, bez względu na zjawiska i procesy społeczno-polityczne, miejsce to było wyjątkowe. Stanowiło centrum życia kulturowego i społecznego, było miejscem wymiany towarów i zwyczajów. To właśnie te zjawiska warunkowały napływ możnych kupców, którzy kierując się perspektywą rozwoju budowali tu swe domostwa - kamienice. Upływający czas, a wraz z nim zmiany wizji architektonicznej powodowały ewolucję zabudowy okalającej rynek.

Ze względu na wiek oraz wartość architektoniczną kamienice stanowią ważny element zabudowy śródmiejskiej, a jako obiekty objęte ochroną konserwatorską wymagają poświęcenia im szczególnej uwagi. Powszechną praktyką, wynikającą z reprezentatywnej funkcji zabudowy, związaną z utrzymaniem dobrego stanu technicznego, a także estetyki jest dbanie m.in. o frontową elewację. (Przez dbanie rozumieć należy brak możliwości ingerencji w wygląd elewacji – sytuacją nie do pomyślenia jest skucie elementów ozdobnych celem wykonania zabezpieczenia termicznego przy użyciu styropianu, co w przypadku elewacji od strony podwórza jest praktyką częstą, na którą zazwyczaj przyzwala konserwator zabytków). Warunkiem niezbędnym i koniecznym związanym z powyższym zagadnieniem jest dobór odpowiednich materiałów i systemów naprawczych, które zastosowane w sposób zgodny z przeznaczeniem gwarantują zabezpieczenie elementów konstrukcyjnych, a przez to poprawę stanu istniejącego.

Wiadomym jest, iż każdy obiekt budowlany narażony jest na oddziaływanie środowiska, głównie nieustannie krążącej wody, która napiera z każdej możliwej strony. Aby zapobiec powstawaniu niekorzystnych zjawisk spowodowanych nadmiernym zawilgoceniem, a wraz z nim zasoleniem budynku, niezbędnym jest odcięcie dopływu wody do elementów konstrukcyjnych. W tym celu wykonywane są odpowiednie zabezpieczenia, zapobiegające wnikaniu wody w głąb struktury materiału. Pytanie brzmi: jakie kroki należy przedsięwziąć jeśli stwierdzono nieodpowiednią izolację lub, jak często bywa w przypadku obiektów zabytkowych, jej brak. Pierwszym krokiem powinno być wykonanie odpowiednich zabiegów mających na celu odcięcie dalszego dopływu wody. Aktualnym pozostaje jednak problem nadmiaru wilgoci oraz soli budowlanych, uprzednio zmagazynowanych wewnątrz struktury materiałów wchodzących w skład konstrukcji. Sprawdzonym rozwiązaniem jest wykonanie kompleksowej renowacji z zastosowaniem tynków renowacyjnych. W niniejszym artykule obiektem badań są kamienice usytuowane na rzeszowskim Starym Rynku, których elewacje zostały odnowione w przeciągu kilku ostatnich lat. Przedmiotem przeprowadzonych badań jest sprawdzenie celowości zastosowanych rozwiązań.

## 2. Stosowane materiały

Właściwy dobór tynku ma znaczący wpływ na późniejszy stan techniczny, a co za tym idzie estetykę obiektu. Prawidłowym przykładem jest stosowanie tynków renowacyjnych ze względu na szereg właściwości, wśród których wyróżnić należy zwiększoną porowatość i dyfuzyjność. W praktyce często spotykanym zwyczajem jest zastępowanie tychże tynków innymi tynkami. Materiałem stosowanym w zastępstwie są tynki wapienne, cementowe lub wapienno cementowe, które nie są w stanie sprostać napierającej wodzie oraz solom mineralnym, a co za tym idzie zapewnić trwałości wykonanym w ten sposób pokryciom elewacji.

Pierwszym rodzajem tynków stosowanych przy pracach konserwatorskich są, uważane za spoiwo historyczne, tradycyjne tynki wapienne. Mają one największą podatność na zniszczenie poprzez procesy związane z przedostawaniem się rozpuszczonych soli mineralnych. Ma to bezpośredni związek z ich strukturą, która umożliwia wzmożone podciąganie kapilarne. Czynnikiem eliminującym ten rodzaj tynku są wysoka nasiąkliwość i chłonność wilgoci z powietrza [3].

Tynki cementowe w przeciwieństwie do wapiennego odpowiednika charakteryzują się wyższą wytrzymałością na uszkodzenia mechaniczne. Ze względu na pory o bardzo małej powierzchni szybko ulegają zawilgoceniu, co przy założeniu współistnienia soli doprowadzi do ich krystalizacji powodując tym samym zmniejszenie powierzchni porów i utrudnione odparowywanie zgromadzonej wody [1, 10].

Ostatnimi niespełniającymi standardów tynkami, spotykanymi w przypadku prac renowacyjnych są tynki cementowo – wapienne. Charakteryzują się poprawionymi właściwościami w stosunku do tynków wapiennych oraz cementowych. Podobnie jednak jak wyżej wymienione tynki nie są przydatne w przypadku zawilgoconych murów, gdyż posiadają małą zdolność do akumulacji soli, a także są słabo dyfuzyjne [2].

Środkiem łączącym przydatne cechy tynku cementowo – wapiennego z polepszonymi parametrami przyczyniającymi się do samoosuszenia muru są tynki renowacyjne. Posiadają one w swej strukturze dużą ilość porów (świeża zaprawa >25%, stwardniała >40%), dzięki czemu mogą skutecznie akumulować sole wewnątrz swej struktury, jednocześnie nie obniżając estetyki elewacji. Dodatkowo tynki renowacyjne posiadają współczynnik oporu dyfuzyjnego na poziomie  $\mu \leq 12$ , co zapewnia migrację pary wodnej (z muru do otoczenia) przy jednoczesnym koncentrowaniu wilgoci i soli budowlanych w przypowierzchniowych warstwach muru [6].

W celu uzyskania najlepszego możliwego efektu nie wystarczy jedynie zastosować tynk renowacyjny z aprobatą organizacji Naukowo-Technicznej Grupy Roboczej ds. Utrzymania Budowli i Ochrony Zabytków. Pomijając potrzebę odcięcia muru od dalszego dopływu wilgoci (izolacja pionowa i pozioma) pamiętać należy, iż system uwzględnia wykonanie poszczególnych warstw (obrutka, tynk podkładowy, tynk renowacyjny) we współpracy z materiałami dodatkowymi (preparat do neutralizacji soli, szpachlę wygładzającą, farby do wymalowań) w zależności od poziomu zasolenia muru. Tabele 1 i 2 ilustrują poziomy zasolenia i zależne od nich układy warstw.

Tabela 1. Klasyfikacja stopnia zasolenia muru. Systemy PCI do renowacji i izolowania zawilgoconych budynków, na podstawie [5]

Table 1. Graduation of wall salinity, PCI solutions, based on [5]

Rodzaj soli		Zawartość soli [%]		
		Niski	Średni	Wysoki
Chlorki	Cl <sup>-</sup>	< 0,2	0,2-0,5	> 0,5
Siarczany	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	< 0,5	0,5-1,5	> 1,5
Azotany	NO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	< 0,1	0,1-0,3	> 0,3

Tabela 2. Grubości warstw tynku renowacyjnego w zależności od stopnia zasolenia muru. Systemy PCI do renowacji i izolowania zawilgoconych budynków, na podstawie [5]

Table 2. Thickness of renovation plaster regarding to wall salinity, PCI solutions, based on [5]

Stopień skażenia muru	Układ warstw	Grubość poszczególnych warstw
Niski	obrutka	ok. 0,5 cm
	tynk renowacyjny	≥ 1,0 cm
Średni	obrutka	ok. 0,5 cm
	tynk renowacyjny	2,0 cm
Wysoki	obrutka	ok. 0,5 cm
	tynk podkładowy	≥ 1,0 cm
	tynk renowacyjny	2,0 cm

### 3. Rzeszów – Stary Rynek

Historia Rzeszowa nieodzownie związana jest ze Starym Rynkiem, który od początku swojego istnienia (1354r.) stanowi centrum kultury i handlu. Rola Rzeszowa jako punktu wymiany dóbr wynikała z jego usytuowania. Krzyżowały się tu lądowe szlaki handlowe, dodatkowym atutem była bliskość rzeki Wisłok.

Początkowo lokalizacja Starego Rynku była kwestią problematyczną ze względu na istnienie dwóch, a nawet trzech grodów. Ostatecznie Rynek usytuowano na lessowym wzgórzu znajdującym się pomiędzy nimi [4].

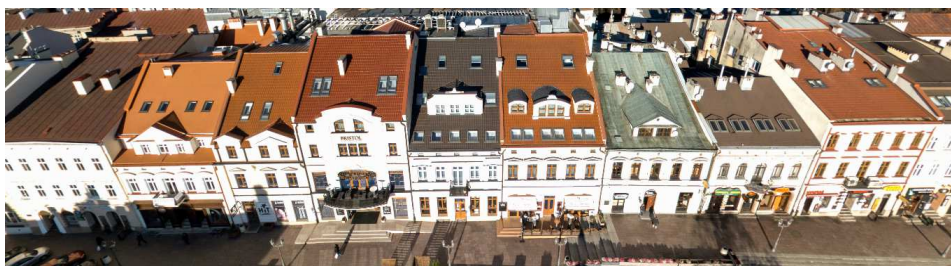
Kamienice znajdujące się w rynku wybudowane zostały na przełomie wieków. W roku 1591, ówczesny gospodarz miasta ufundował ratusz, który znajdował się w miejscu obecnego. W owych czasach zabudowa rynku miała charakter drewniany z murowanymi piwnicami [7]. Pierwsze kamienice wybudowane metodą tradycyjną (z cegły) datuje się na I połowę XVII wieku [8]. Kolejne stulecie charakteryzowało się bardzo ścisłą zabudową realizowaną według projektów nadwornych architektów, którzy mając na uwadze bezpieczeństwo pożarowe kierowali się zakazem wznoszenia wysokich dachów. Wygląd rynku wraz z wystrojem elewacji kamienic określony został na przełomie XIX i XX w. Warty podkreślenia jest fakt, iż w miejscu obecnego wejścia do podziemi znajdowały się dwie kamienice, które zostały wyburzone przez nazistów w okresie okupacji [9].





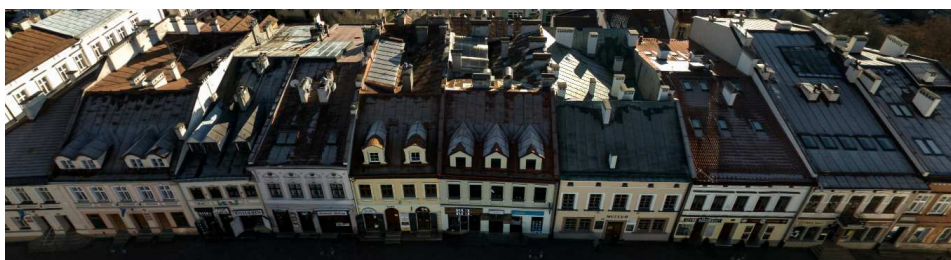
Rys. 1. Pierzeja zachodnia, fot. <http://rynek.rzeszow.pl>, dostęp 02.2017

Fig. 1. Western frontage, fot. <http://rynek.rzeszow.pl>, access 02.2017



Rys. 2. Pierzeja południowa, fot. <http://rynek.rzeszow.pl>, dostęp 02.2017

Fig. 2. Southern frontage, fot. <http://rynek.rzeszow.pl>, access 02.2017



Rys. 3. Pierzeja północna, fot. <http://rynek.rzeszow.pl>, dostęp 02.2017

Fig. 3. Northern frontage, fot. <http://rynek.rzeszow.pl>, access 02.2017

#### 4. Badania

Kamienice stanowiące zabudowę rzeszowskiego Starego Rynku w przeciągu ostatnich lat poddane zostały naprawom ukierunkowanym na poprawę ich stanu technicznego poprzez wzmocnienie i zabezpieczenie konstrukcji. W zakres prac związanych z zabezpieczeniem zaliczyć należy wykonanie izolacji chroniących elementy konstrukcji przed naporem wód zewnętrznych oraz tynków renowacyjnych umożliwiających odprowadzanie uprzednio zgromadzonej wilgoci, a także akumulacji soli budowlanych. Obiekty, w których zastosowano tynki renowacyjne powinny wykazywać niższy poziom zawilgocenia, nawet w przypadku wadliwie wykonanych izolacji poziomych.

W ramach przeprowadzonych badań, kierując się chęcią sprawdzenia celowości zastosowanych tynków, wykonano serię odczytów poziomów wilgotności. Wyniki zestawiono w postaci tabelarycznej, dla każdej kamienicy z osobna z uwzględnieniem zastosowanego pokrycia elewacji (tab. 3-5).

Tabela 3. Pierzeja północna – Stary Rynek w Rzeszowie

Table 3. Northern frontage – Old Square in Rzeszów

Nr kamienicy	Rodzaj pokrycia elewacji	Stopień zawilgocenia
3.	okładzina z cegły	brak / danych
4.	styropian + tynk cienkowarstwowy	cokół 19,2% ościeżnica 14,0%
5.	cementowo - wapienny	ściana 11,2% cokół 15,9%
6.	cementowo - wapienny	ściana: częściowo odparzona częściowo 8,5% okno ościeżnica 16,3% drzwi ościeżnica 18,2%
7.	styropian + tynk cienkowarstwowy	b/d
8.	cementowo - wapienny	ściana 10,7%
9.	cementowo - wapienny	ściana: częściowo odparzona częściowo do 6,2% cokół: częściowo odparzony częściowo 10,5%
10.	cementowo - wapienny	ściana 11,1% (max. 11,5%)
11.	tynk renowacyjny do wysokości 1m tynk cementowo – wapienny powyżej 1m	ściana: do wysokości 1m 6,5% (max. 6,9%) powyżej 1m 12,3% (max 12,5%)
12.	tynk renowacyjny do wysokości 1m tynk cementowo – wapienny powyżej 1m	ściana: do wysokości 1m 5,2% powyżej 1m 12,2% (max. 13,2%)

Tabela 4. Pierzeja zachodnia - Stary Rynek w Rzeszowie

Table 4. Western frontage – Old Square in Rzeszów

Nr kamienicy	Rodzaj pokrycia elewacji	Stopień zawilgocenia
13.	tynk renowacyjny	ściana 3,3% (max.3,5%) cokół 18,5%
14.	tynk renowacyjny	ściana 3,5% (max. 4,2%) cokół odparzony ościeżnica drzwi 12,0% (farba olejna)
15.	cementowo - wapienny	ściana: częściowo odparzona częściowo 10,1% (max. 10,7%)

Tabela 5. Pierzeja południowa – Stary Rynek w Rzeszowie

Table 5. Southern frontage – Old Square in Rzeszów

Nr kamienicy	Rodzaj pokrycia elewacji	Stopień zawilgocenia
16.	cementowo - wapienny	ściana: częściowo odparzona częściowo do 5,9% cokół 14,2%
17.	cementowo - wapienny	ściana 8,5% cokół 6,0% ościeżnica drzwi 12,0% (farba olejna)
18.	cementowo - wapienny	ściana: częściowo odparzona częściowo 12,0% ościeżnica 11,6%
19.	tynk renowacyjny	ściana: 3,9% (max. 4,6%)
25.	cementowo - wapienny	ściana: częściowo odparzony częściowo 11,9% (max. 13,0%) drzwi 12,2%

## 5. Wnioski

Podstawowym zagadnieniem związanym z przeprowadzonymi badaniami było określenie przydatności tynków stosowanych podczas prac naprawczych. Cechą wskazującą na poprawność zastosowanych rozwiązań systemowych był poziom zawilgocenia elewacji. Otrzymane wyniki porównano z normowymi wymogami, które przedstawiono w tabeli nr 6.

Tabela 6. Klasyfikacja murów ze względu na poziom zawilgocenia. Renowacja budynku mieszkalnego wielorodzinnego przy ul. Ks. Jałowego 5 w Rzeszowie

Table 6. Classification of wall dampness. Renovation of residential building located at Ks. Jałowego 5 in Rzeszów

Lp.	Stopień zawilgocenia [%]	Klasyfikacja muru
I	0-3	mury o dopuszczalnej wilgotności
II	3-5	mury o podwyższonej wilgotności
III	5-8	mury średnio wilgotne
IV	8-12	mury mocno wilgotne
V	> 12	mury mokre

Na badanych obiektach w większości przypadków stwierdzono obecność tynków cementowo wapiennych. Zaznaczyć należy, iż jedynie na 5 spośród 18 uwzględnionych obiektów referencyjnych zanotowano obecność tynków renowacyjnych (dwa z nich wykonano w sposób mieszany tj.: przy użyciu tynków renowacyjnych, do wysokości 1m nad poziomem terenu, w połączeniu z tynkami cementowo – wapiennymi na wyższych partiach elewacji). Elewacja kamienicy nr 3 wykonana jest z cegły, natomiast elewacje kamienic nr 4 i 7 wykonano poprzez zastosowanie styropianu pokrytego tynkiem cienkowarstwowym, do czego odniesiono się w dalszej części artykułu.

Na obiektach, których elewacje wykonano z tynków cementowo – wapiennych zachodzą procesy wynikające z ograniczonej dyfuzji wilgoci, co bezpośrednio prowadzi do odparzania, a następnie odpadania płatów tynku (rys. 4.). Podkreślić należy, iż odparzenia znacząco wpływają na zakłócenie odczytu wilgotności, co spowodowane jest pustkami powstającymi w strefie przypowierzchniowej muru. Zjawisko to należy tłumaczyć wysoką zawartością cementu na co jednoznacznie wskazuje charakterystyczny ciemny kolor tynku.

W przypadku zastosowania tynków renowacyjnych stwierdzono obniżony poziom zawilgocenia murów. Rzeczą wartą podkreślenia jest fakt, iż wszystkie badane elewacje wykazują poziom zawilgocenia przekraczający normowe progi określające jego stan jako dopuszczalny. Sytuacja, w której poziom zawilgocenia wskazuje na mur o podwyższonej wilgotności (nie przekracza poziomu 5% zawilgocenia) może być uznana za dopuszczalną ze względu na kontakt elewacji ze środowiskiem zewnętrznym. Stan taki zaobserwowano na kamienicach nr 13 (3,3%), 14 (3,5%) oraz 19 (3,9%). Zawilgocenie dochodzące do poziomu 5% może świadczyć o wcześniejszej bardzo dużej wilgotności muru, wadliwie wykonanym tynku renowacyjnym lub zastosowaniu słabo dyfuzyjnych farb. Dodatkowo zawilgocenie nie przekraczające 5% świadczyć może o skutecznej izolacji.

Wpływ doboru systemu renowacji na późniejszy stan i trwałość elewacji widoczny jest na przykładzie kamienic nr 11 i 12 gdzie zastosowano tynk renowacyjny do wysokości 1,0m, a powyżej tynk cementowo - wapienny. Poziom za-



Rys. 4. Korozja tynku, fot. autor, Luty 2017

Fig. 4. Degradation of plaster, fot. author, February 2017

wilgocenia tynków renowacyjnych w obu przypadkach przekracza wartość 5%, co świadczy o braku skutecznej izolacji poziomej muru. Różnica poziomów zawilgocenia pomiędzy poszczególnymi strefami (tynk renowacyjny, a cementowo – wapienny) wynosi ok. 6%. Dwukrotnie wyższy poziom zawilgocenia w strefie tynku cementowo – wapiennego wywołany jest różnicą w strukturze, warunkującą głównie zmniejszenie powierzchni porów i niższą dyfuzyjność.

Praktyka wskazuje, że po wykonaniu izolacji poziomej oraz prawidłowego systemu renowacji muru, wilgoć po okresie 3 lat od ich wykonania, powinna spaść do poziomu dopuszczalnego.

Korzystny wpływ tynku renowacyjnego widoczny jest na kamienicach 13 i 14, których ściany w porównaniu ze strefą cokołową wykazują nawet 6 krotnie niższe zawilgocenie. Świadczy to o wysokiej dyfuzyjności tynku z jednoczesną zdolnością do akumulacji soli budowlanych wewnątrz jego struktury.

Widoczne na zdjęciu (rys. 5.) uszkodzenia strefy cokołowej świadczą o braku skutecznej izolacji poziomej oraz błędach wykonawczych polegających na klejeniu kamiennej okładziny bezpośrednio na wysoce zawilgoconej ścianie (zawilgocenie cokołów sięga poziomu 18% - mur mokry). Pamiętać należy, iż piaskowiec jest materiałem, który ze względu na swoją strukturę mocno chłonie wodę. Nie poddany odpowiednim zabiegom impregnacyjnym skoroduje.





Rys. 5. Korozja cokolu, fot. autor, Luty 2017

Fig. 5. Corrosion of pedestal, fot. author, February 2017

Brak tynku renowacyjnego stwierdzono również na ościeżnicach i gzymsach kamienic nr 13 i 14. Warto pamiętać, iż gzymsy, jako elementy ciągłe bardzo często wykonywane są z zaprawy cementowej co w połączeniu z niewłaściwą okładziną doprowadzi do odspajania nałożonego tynku bądź wyprawy malarzkiej. Zjawisko to zilustrowane zostało na rys. 6-7.



Rys. 6. Uszkodzony gzyms, fot. autor, Luty 2017

Fig. 6. Degradation of mantelpiece, fot. author, February 2017

Kamienica nr 13 jest również przykładem błędu wykonawczego polegającego na zbyt mocnym dociskaniu szpachli. Zacieranie „na gładko” obniża estetykę elewacji, a co gorsze powoduje kondensację spoiwa na powierzchni tynku. Wynikiem takich działań jest pojawienie się rys skurczowych i obniżenie dyfuzyjności [6].



Rys. 7. Zatarcie na gładko, fot. autor, Luty 2017

Fig. 7. Inappropriate accomplishment of plaster, fot. author, February 2017

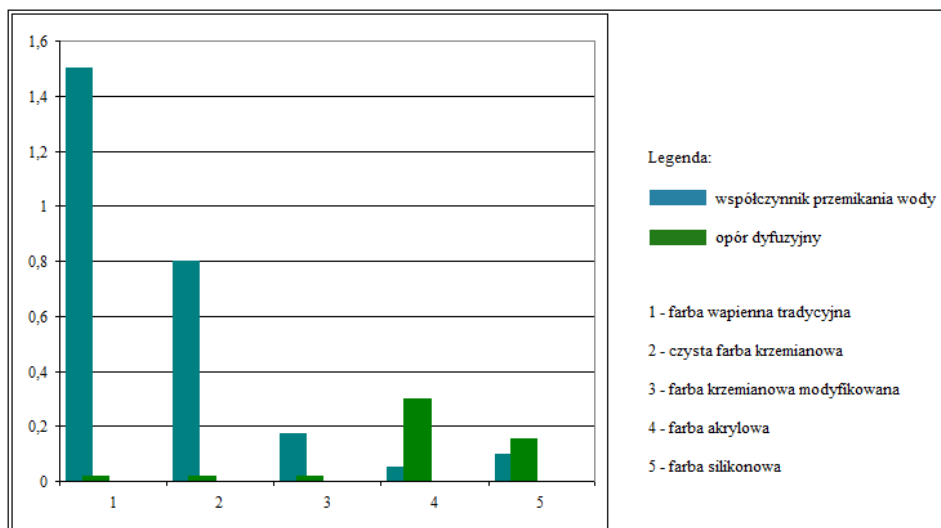
Złym nawykiem jest uzupełnianie skorodowanego tynku (rys. 8.) poprzez nanoszenie materiałów różniących się charakterystyką w stosunku do tynku istniejącego. Niedopuszczalnym jest stosowanie materiałów o niskiej paroprzepuszczalności, przykładowo szpachli cementowych. [6]

Ważnym czynnikiem, decydującym o prawidłowym funkcjonowaniu systemu tynków renowacyjnych jest stosowanie farb o możliwie najniższym oporze dyfuzyjnym i współczynniku przenikania wody (rys. 9.). Spośród dostępnych na rynku farb, najodpowiedniejszą, w przypadku obiektów uprzednio zawilgoconych, jest farba sylikatowa (czysta farba krzemianowa).



Rys. 8. Nieprawidłowe uzupełnienie skorodowanego tynku, fot. autor, Luty 2017

Fig. 8. Inappropriate way of fixing the plaster, fot. author, February 2017



Rys. 9. Zależność między współczynnikiem dyfuzji pary wodnej, a nasiąkliwością farb, fot. autor, Luty 2017

Fig. 9. Dependence of paint characterization, fot. author, February 2017



Rozwiązaniem, które wraz z upływem czasu spowoduje wzrost zawilgocenia elementu jest stosowanie farb akrylowych. Charakteryzują się one znikomą paroprzepuszczalnością (duży opór dyfuzyjny). Przykładem potwierdzającym teorię jest stan kamienicy nr 17 (rys. 10.), której ościeżnice są bardzo mocno zawilgocone (12%).



Rys. 10. Kamienica nr 17, fot. autor, Luty 2017

Fig. 10. Tenement house number 17, fot. author, February 2017

Znajdująca się w rynku kamienica nr 4 (rys. 11.) jest przykładem wadliwej konstrukcji warstw elewacji. Pokrycie ściany styropianem powoduje podwyższenie strefy podciągania kapilarnego, a w związku z tym wzmożone zawilgocenie w wyższych partiach muru. Poziom zawilgocenia strefy cokołowej (19,2 %) wskazuje na brak izolacji poziomej i jest przyczyną odparzania warstw pokrycia elewacji. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku kamienicy nr 17 (strefa cokołowa 6%, ściana 8,5%).



Rys. 11. Kamienica nr 4, fot. autor, Luty 2017

Fig. 11. Tenement house number 4, fot. author, February 2017

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują, iż słusznym rozwiązaniem w przypadku usuwania zawartości wilgoci z murów obiektów zabytkowych jest stosowanie tynków renowacyjnych posiadających atest organizacji Naukowo-Technicznej Grupy Roboczej ds. Utrzymania Budowli i Ochrony Zabytków. Wszelkie inne rozwiązania mają charakter tymczasowy. Stosowanie nieodpowiednich rozwiązań systemowych doprowadza do pogorszenia stanu technicznego elewacji, co bezpośrednio wpływa na obniżenie walorów estetycznych obiektu oraz na wzrost kosztów eksploatacji. Dodatkowo pamiętać należy, iż tynki renowacyjne nie są złotym środkiem i bez uprzedniego wykonania izolacji poziomej przegrody, wpływ destrukcyjnego działania wód zostanie jedynie tymczasowo zahamowany.

## Literatura

- [1] Hölzen F-J.: Renowacja przy problemach wynikających z zasolenia i wilgoci, B+B 2009.
- [2] Pluta A., Pluta K.: Tynki w budownictwie cz.I., Inżynier budownictwa 2014.
- [3] Rokieli M., Magott C.: Tynki renowacyjne, Inżynier budownictwa 2012.
- [4] Kotula F.: Tamten Rzeszów. Libri Ressoivienses, Rzeszów, 1997.

- [5] PCI. Systemy PCI do renowacji i izolowania zawilgoconych budynków, BASF Polska, Śrem, 2016.
- [6] Rokieli M.: Poradnik. Hydroizolacje w budownictwie, Medium, Warszawa, 2006.
- [7] Borowiejska-Birkenmajerowa M.: Rozwój przestrzenny miasta za Mikołaja Spytka Ligęzy. W: Dzieje Rzeszowa, UM Rzeszów, Rzeszów, 1994.
- [8] Malczewski J.: Zabudowa mieszczańska. W: Dzieje Rzeszowa, UM Rzeszów, Rzeszów, 1994.
- [9] Rzeszów dawniej i dziś - Rynek Główny, <http://mariten.blog.onet.pl/> (dostęp: 19.02.2017).
- [10] Sikorski K.: Renowacja budynku mieszkalnego wielorodzinnego przy ul. Ks. Jałowego 5 w Rzeszowie, Praca inż., Politechnika Rzeszowska, 2015.

## **OLD MARKET IN RZESZOW – PLASTERS USED DURING RESTORATION WORKS OF HISTORICAL BUILDINGS. TECHNOLOGICAL ASPECTS**

### **S u m m a r y**

The market is a place with significant cultural advantages and his state is a proff of potential and the rank of city or town. Due to that fact, attention is being put to aesthetics of frontal elevation of tenement houses located around the historical square. Quality od performed work and materials used in renovation has main influence on technical condition of front elevations. Renovation issue is strongly connected with diagnosis, repair and usage solution of building. In the article attention is being paid to the appropriateness of applied covers of elevation on the example of the Rzeszów Old Square (buildings were fixed in past few years). Few kinds of plaster were put under consideration (lime plaster, cement plaster, lime and cement plaster, renovation plaster). According to examinations of current state of referentail buildings conclusions were made. Only renovation plaster enabled to fulfil design assumptions, i.e.: influenced on lowering the moisture of walls. Indisputable advantage of renovation plaster (resulting from their composition and the structure) is ability to accumulate melted minerals inside plaster leeks what makes them more permanent (plaster coming off from the surface of a wall has not been stated). Additionally the issues of performance of renovation works and influecne of materials quality were brought up.

**Keywords:** Rzeszow, Old Market, renovation plaster, dampness, salinity

*Przesłano do redakcji: 2.10.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Nadiia SPODYNIUK<sup>1</sup>  
Olena GUMEN<sup>2</sup>  
Oksana OMELCHUK<sup>3</sup>

## THERMAL PROCESSES IN INDUSTRIAL PREMISES WITH USING INFRARED HEATING SYSTEMS

Saving issues are important for any country with an appropriate level of economic development; taking into account the modern conditions of development of Ukraine. This problem is very important, especially considering incremental resource constraints in all areas of the national economy's development. The component of quality of such a process requires certain conditions in which there are a need to develop innovative approaches to training and maintenance of production, one of which is to ensure a comfortable temperature conditions in production facilities.

The article presents the results of experimental research of thermal processes in industrial premises with energy-saving technologies of heating and their analysis by geometric modeling tools and graphic computer technologies. The effectiveness of using the method of forced feeding of air heated by infrared emitter involving compromise graphical optimization was analyzed by geometric way.

As a result of research of thermal processes in industrial premises the problem of establishing a comfortable way of heating of the working zone combining the use of infrared heaters with forced ventilation was formulated and solved.

On the basis of use dependences obtained experimentally of three parameters of thermal process – air temperature, heat flow power and height of installation of infrared heater – graphical tools were proposed and approved in processing experimental data. This made it possible to apply the dependence of these parameters by second order surface of three-dimensional parameter space of the thermal process.

**Keywords:** energy-saving systems, infrared heating, graphic computer technologies, geometric modeling

---

<sup>1</sup> Author for correspondence / autor do korespondencji: Nadiia Spodyniuk, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation at Lviv Polytechnic National University, St. Bandery, 12, 79013, Lviv - 13, Ukraine, +380971210924, e-mail: n-spoduniuk@meta.ua

<sup>2</sup> Olena Gumen, Department of Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics at National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy pr., 37, 03056, Kyiv, Ukraine, +380634909195, e-mail: gumens@ukr.net

<sup>3</sup> Oksana Omelchuk, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation at Lviv Polytechnic National University, St. Bandery, 12, 79013, Lviv - 13, Ukraine, +380672540485, e-mail: oksana.o@meta.ua

## 1. Introduction

Eurointegrational vector of Ukraine's development covers all the components of its factors of life, and energy (energetics) is the basis and the guarantee of these factors. The use of energy requires fundamentally new approaches to their practical application, mainly among which is energy savings. Experience of the global economy confirms the main conclusion that the efficient use of fuel resources is the key to stable economic development and indicates the appropriate level course positive processes in the country.

Saving issues are important for any country with an appropriate level of economic development; taking into account the modern conditions of development of Ukraine. This problem is very important, especially considering incremental resource constraints in all areas of the national economy's development. Because of it problem of economy is extremely important, especially energy carriers. First of all, there are issues of resource provision is extremely relevant in the fields of industrial and agricultural production with the use of technological processes in industrial buildings and structures. It is obvious that in matters of price-quality software process flow can be no compromise [1-3]. The component of quality of such a process requires certain conditions in which there are a need to develop innovative approaches to training and maintenance of production, one of which is to ensure a comfortable temperature conditions in production facilities.

The goal of the article is to study regularities of thermal processes in industrial premises using combined energy-saving technologies of heating.

One of the many variants of the use of infrared emitting is its attraction as a main element of the internal heating systems of buildings and structures. The beam component, which is constructed on the basis of the use of this type of emitting heater, has the advantage of providing proper conditions of stay in the staff room at lower air temperatures in working areas. Note also its positive effect on equipment located in the room [4, 5].

## 2. Experimental research

The property of warm air is that due to convection it goes up to the upper zone of the room and does not participate in the space heating process. One of the measures to attract it to the heating system is the forced ventilation. The experimental setup contains necessary active elements for research – an infrared heater and a fan, and a control instrument – thermometer with its operational installation anywhere in the turbulent area of industrial premises (Fig. 1). It is possible to carry out research at enabled and disabled modes of fan.

In the room 1 over infrared heater 2, fan 3 is located, which is powered via a switch 4 from block 5, which is attached to the infrared heater 2. The thermometer 6 can be located at any point of the room 1. However, by given the

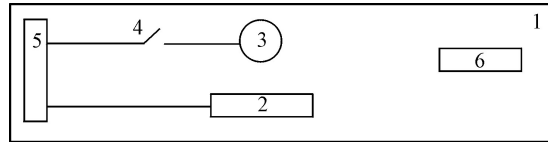


Fig. 1. Block diagram of the experimental system equipment of infrared heating  
1 – room; 2 – infrared heater; 3 – fan; 4 – switch; 5 – block; 6 – thermometer

Rys. 1. Schemat blokowy eksperymentalnego wyposażenia systemu podczerwiieni  
1 - pokój; 2 - podgrzewacz podczerwiieni; 3 - wentylator; 4 - przełącznik; 5 - blok; 6 - termometr

technical possibilities of experiment, thermal power of infrared heater  $Q$  changed between operating range of 500...1500 W in increments  $\Delta Q = 500$  W, and height of its installation  $h$  was 1.13...1.73 m in increments  $\Delta h = 0.3$  m [6,7].

Based on the physiological characteristics of growth in staff, conducted an experiment with the measurement of relative air temperature  $\bar{t}$  from the density of the heat flow of the emitter  $q$  at height of installation 1.73 m (Fig. 2).

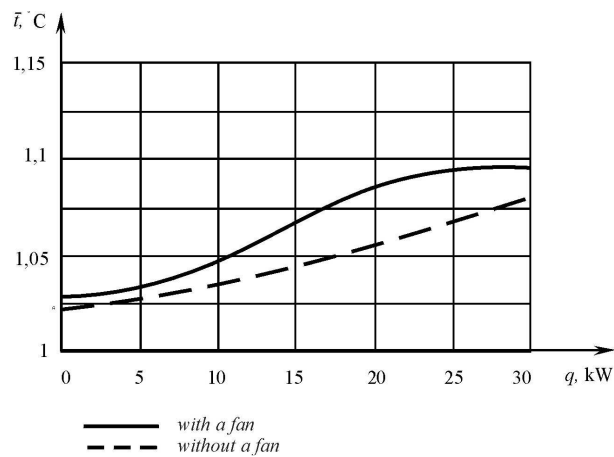


Fig. 2. Effect of the fan to relative air temperature  $\bar{t}$  indoors,  $h = 1.73$  m (curves plotted for the five values of density of the heat flow  $q$ )

Rys. 2. Wpływ wentylatora na względną temperaturę  $\bar{t}$  w pomieszczeniu,  $h = 1,73$  m (krzywe zbudowane na pięć wartości  $q$ )

### 3. Geometric modeling of graphic dependencies

The results of the experiment without and with fan (Fig. 2) show that the intensity of change of relative air temperature  $\bar{t} = f(q)$  in working area of change of heat flow density of the emitter  $q$  in the range 0...30 kW/m<sup>2</sup> can be divided into a number of ranges (Fig. 3).

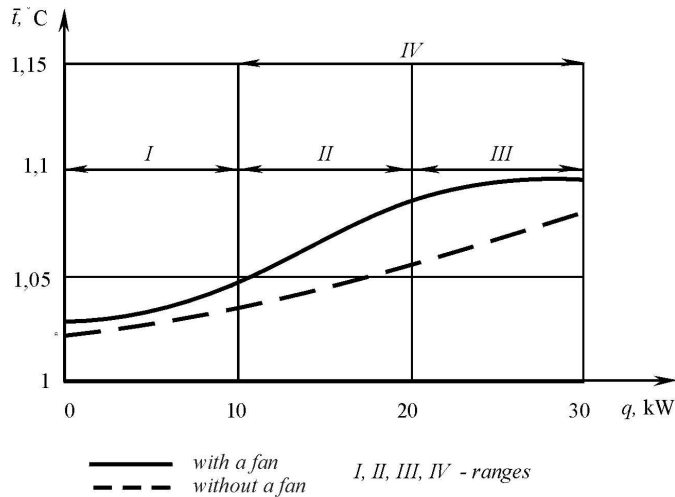


Fig. 3. Ranges of change of relative air temperature  $\bar{t}$

Rys. 3. Zakresy zmian względnej temperatury powietrza konwekcyjnego  $\bar{t}$

In the absence of a fan relative air temperature  $\bar{t}$  almost linearly rises in a I range and in a IV range. In the I range when changing the density of the heat flow  $q$  between 0...10 kW/m<sup>2</sup>, relative air temperature  $\bar{t}$  changes by  $\Delta \bar{t} = 0.01$  (Fig. 3), and in the IV range when changing the density of the heat flow  $q$  in the range of 10...30 kW/m<sup>2</sup> increase in temperature by  $\Delta \bar{t} = 0.045$  is indicated.

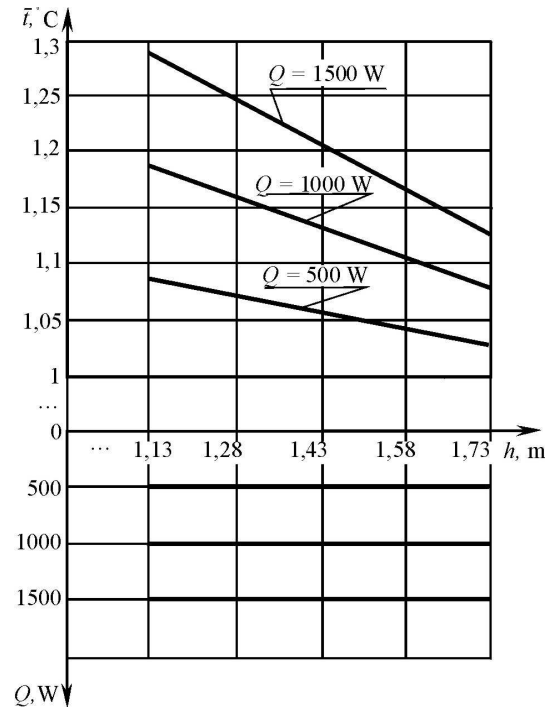
In general, the temperature rise is not uniform in two ranges, and changing the density of the heat flow of emitter  $q$  in the range 0...30 kW/m<sup>2</sup> increase in temperature  $\Delta \bar{t} = 0.055$ .

When the fan is switched-on relative air temperature  $\bar{t}$  varies almost exponentially by the law in three ranges. The intense temperature change takes place in the II range: when you change the density of the heat flow of the emitter  $q$  in the range of 10...20 kW/m<sup>2</sup> relative air temperature  $\bar{t}$  changes by  $\Delta \bar{t} = 0.03$ , and the intensity of relative temperature increase is less in the I and III ranges and, respectively, amounts  $\Delta \bar{t}_I = 0.02$  and  $\Delta \bar{t}_{III} = 0.01$ .

In the operating range of change of heat flow density in both cases, when using a fan and without it, extrema is absent. The maximum and minimum values of relative temperature are attained at the beginning and the end of range of heat flow density change of emitter  $q$ .

In three-dimensional space  $\bar{t} = f(Q, h)$  parameters associated with simple analytical expression  $\bar{t} = f(Q, h)$  are visualized by the surface, and graphic dependences are projections of this surface obtained at constant thermal power of the infrared heater  $Q$  (Fig. 4).



Fig. 4. Surface projections  $\bar{t} = f(Q, h)$ Rys. 4. Projekcja powierzchni  $\bar{t} = f(Q, h)$ 

Constant values of thermal power of the infrared heater  $Q$  determine position in the space of intersecting front level planes whose intersections with the surface  $\bar{t} = f(Q, h)$  produce a set of curves  $\bar{t} = f(h)$  in the frontal plane of projections  $O\bar{t}h$  (Fig. 5).

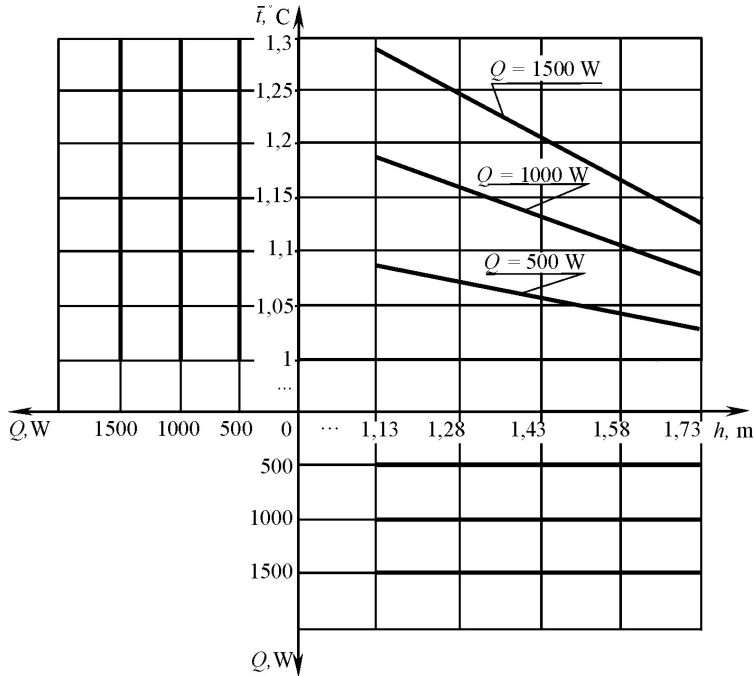


Fig. 5. Setting the surface  $\bar{t} = f(Q, h)$  by line frame

Rys. 5. Przypisanie powierzchni  $\bar{t} = f(Q, h)$  do ramy linii

Each of obtained curves  $\bar{t} = f(h)$  project on the horizontal plane of projections  $OhQ$  in the corresponding following projection intersecting the front level plane. It is evident that such projections placed in the profile plane of projections  $O\bar{t}Q$  and collectively form a discrete frame of surface  $\bar{t} = f(Q, h)$ .

This frame makes it possible to receive the projections, and consequently, the coordinates, the numerical values of parameters of point B, belonging to the surface  $\bar{t} = f(Q, h)$ .

Complete the following projection of arbitrary frontal project plane  $\phi$  in the frontal plane of projections (Fig. 6) which point B belongs to. After the corresponding constructions, we obtain the projection of point B in the horizontal plane of projections  $OhQ$  ( $B_1$ ) and profile plane of projections  $O\bar{t}Q$  ( $B_3$ ). According to the projections we determine the numerical values of parameters  $\bar{t}_B, Q_B, h_B$ .

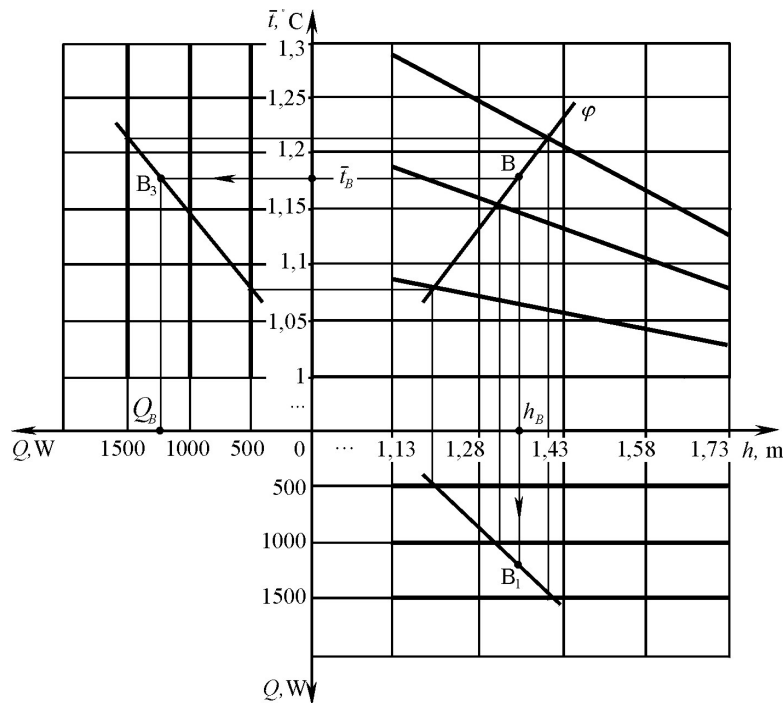


Fig. 6. Definition of the numerical values of parameters  $h$ ,  $Q$ ,  $\bar{t}$  at any point in the space of premises

Rys. 6. Określenie wartości liczbowych parametrów  $h$ ,  $Q$ ,  $\bar{t}$  w dowolnym miejscu pokoju

According to position of the section plane  $\varphi$ , such diagrams give the opportunity to build dependences of parameters that in the experimental conditions are often difficult to obtain, if not impossible. In addition to specific coordinates of point B, plane  $\varphi$  made it possible to build dependences  $Q = f(h)$  and  $\bar{t} = f(Q)$ .

Using the proposed method, we construct the frame of the surface  $\bar{t} = f(Q, h)$  based on values  $Q = 500$  W,  $Q = 625$  W,  $Q = 750$  W,  $Q = 875$  W,  $Q = 1000$  W,  $Q = 1125$  W,  $Q = 1250$  W,  $Q = 1375$  W and  $Q = 1500$  W (Fig. 7).

Built surface of the frame makes it possible to both determine the numerical values of parameters  $h$ ,  $Q$ ,  $\bar{t}$  at an arbitrary point in space in working area of parameters changes, and build relationships which are impossible to obtain due to the technical conditions of the experiment. Figure 7 shows the dependence at constant  $h = 1.2$  m section of the surface of the profile plane with trace levels of  $\delta$ -projection of  $h = 1.2$  in the  $Oh$  axis.

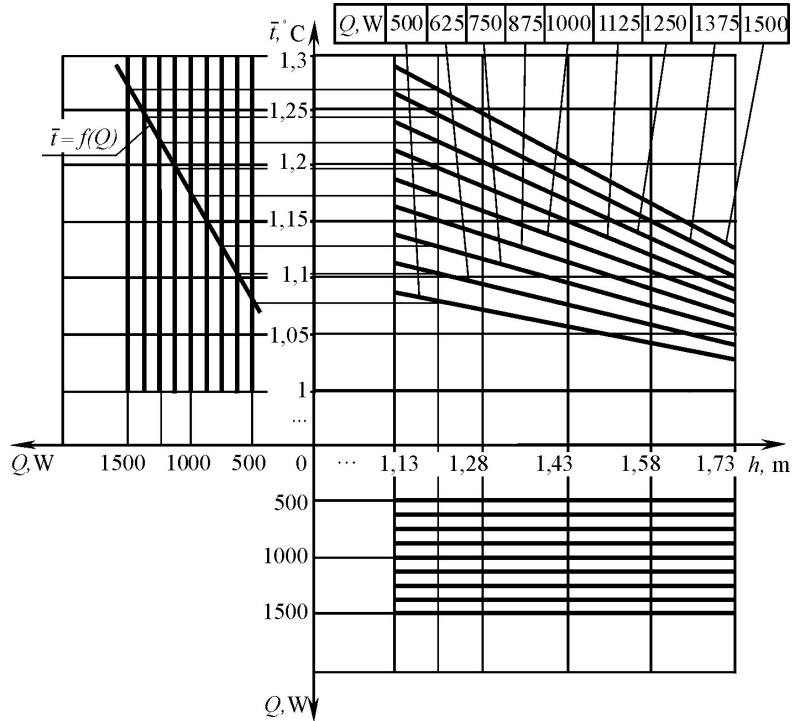


Fig. 7. Construction of the surface frame for nine thermal power values of infrared heater  $Q$

Rys. 7. Konstrukcja ramy powierzchniowej dla dziewięciu wartości mocy cieplnej grzejnika podczerwonego  $Q$

Built surface of the frame can also be used to find equation of the surface. Let us assume that  $Q = y$ , we have there  $z = f(x, y)$ .

By analyzing each of the curves at a constant value, we take a lot of curves as algebraic curves of the second order. They are forming an algebraic surface lines of the second order:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Exz + 2Fyz + 2Gx + 2Hy + 2Kz + L = 0. \quad (1)$$

Cutting this surface with a cross-section plane of the level, for example,  $y_1=500$ , we obtain a surface line, which in the Figure 7 is supplied with graphical dependence at  $y_1 = 500$ . Substituting the value  $y_1$  in (1), we obtain the equation of the line:

$$Ax^2 + By_1^2 + Cz^2 + 2Dxy_1 + 2Exz + 2Fy_1z + 2Gx + 2Hy_1 + 2Kz + L = 0. \quad (2)$$

To determine constant values of coefficients of algebraic equation of the second order we set some constant values  $y_i$  (2). Solving the system of nine equations, we obtain the numerical values of the coefficients (1), which uniquely identify the equation of the surface:

$$\bar{t} = 1.14 + 1.54e^{-4}(Q - 1000) - 0.2(h - 1.43) - 1.53e^{-4}(Q - 1000)(h - 1.43). \quad (3)$$

It is obvious that such an equation approximately describes the surface and corresponds to a received working range of the variation of the parameters  $Q$  and  $h$ .

Computer visualization of equation (3) gives the opportunity to present a surface shape of temperature in the room (Fig. 8).

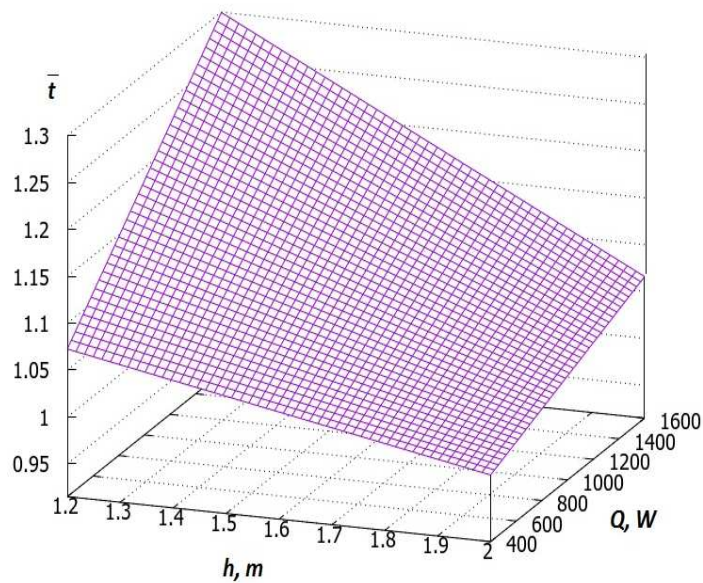


Fig. 8. The surface of temperature in service area

Rys. 8. Powierzchnia temperatury w obszarze serwisowym

The limits of variation of the input factors have changed as follows. For thermal capacity of infrared heater:  $500W \leq Q \leq 1500W$ ; for height of installing the heater:  $1.13 \leq h \leq 1.73$ .

#### 4. Conclusion

The results of experimental studies as well as their geometric interpretation lead to the following conclusions:

As a result of research of thermal processes in industrial premises the problem of establishing a comfortable way of heating of the working zone combining the use of infrared heaters with forced ventilation was formulated and solved.

On the basis of use dependences obtained experimentally of three parameters of thermal process – air temperature, heat flow power and height of installation of infrared heater – graphical tools were proposed and approved in processing experimental data. This made it possible to apply the dependence of these parameters by second order surface of three-dimensional parameter space of the thermal process.

Using all suggested geometric tools can significantly reduce the costs for carrying out the experiment and get the results, the accuracy of which is determined by the accuracy and correctness of the experiment.

#### Bibliography

- [1] Sidenko L. Komp'yuternaya grafika i geometricheskoye modelirovaniye. SPb, Piter, 2009, p. 224.
- [2] Gumen M.S. About the Geometrical Simulation of the multiparameter Systems. Applied Geometry and Graphics, 2001; 70, p. 117-120.
- [3] Gumen O.M., Ljaskovska S.YE., Bodnar H.Y., Shyyko O.YA. Zastosuvannya proektyvnykh bahatovymirnykh prostoriv shchodo rozvyazuvannya prykladnykh zadach tekhniki. Prykladna heometriya ta inzhenerna hrafika, 2011; 50, p. 116-120.
- [4] Yurkevich Y., Spodyniuk N. Energy-saving infrared heating systems in industrial premises. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, 2015; 2(16), p. 140-144.
- [5] Petras D., Kalus D. Effect of thermal comfort/discomfort due to infrared heaters installed at workplaces in industrial buildings. Indoor and Built Environment, 2000; 9, p. 148-156.
- [6] Kimball B A. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming. Global Change Biology, 2005, 11, p. 2041-2056.
- [7] Shcherbovskykh S., Spodyniuk N., Stefanovych T., Zhelykh V., Shepitchak V. Development of a reliability model to analyse the causes of a poultry module failure. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016; 4(3), p. 4-9.

## **TERMICZNE PROCESY W POMIESZCZENIACH PRZEMYSŁOWYCH Z WYKORZYSTANIEM SYSTEMÓW OGRZEWANIA NA PODCZERWIENI**

### **Streszczenie**

Zapewnienie oszczędności jest ważne dla każdego kraju w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu rozwoju gospodarczego, jak również dla rozwoju Ukrainy. Ten problem jest bardzo ważny, szczególnie biorąc pod uwagę ograniczenia zasobów we wszystkich dziedzinach rozwoju gospodarki narodowej. Komponent jakości takiego procesu wymaga pewnych warunków, w których istnieje potrzeba opracowania innowacyjnego podejścia do szkolenia i utrzymania produkcji, jednym z nich jest zapewnienie komfortowych warunków termicznych w obiektach produkcyjnych.

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań nad procesami termicznymi w pomieszczeniach przemysłowych za pomocą energooszczędnych technologii ogrzewania i ich analizy za pomocą narzędzi do modelowania geometrii i graficznych technologii komputerowych. Analizowano sposób wykorzystania przymusowego zasilania powietrzem podgrzewanego przez emiter podczerwony z optymalną kompromisową interpretacją graficzną.

W wyniku badań nad procesami termicznymi w pomieszczeniach przemysłowych sformułowano i rozwiązano problem utworzenia komfortowego sposobu ogrzewania strefy roboczej, łączącego zastosowanie podczerwieni z wymuszoną wentylacją.

Na podstawie zależności użytkowych uzyskanych eksperymentalnie z trzema parametrami temperatury termicznej temperatury powietrza procesowego, mocy cieplnej i wysokości instalacji podgrzewacza podczerwieni zaproponowano i zatwierdzono narzędzia graficzne w przetwarzaniu danych eksperymentalnych. Umożliwiło to zastosowanie zależności tych parametrów przez powierzchnię drugiego rzędu trójwymiarowej przestrzeni parametrów procesu termicznego.

**Słowa kluczowe:** systemy oszczędzania energii, ogrzewanie podczerwone, graficzne technologie komputerowe, modelowanie geometryczne

*Przesłano do redakcji: 24.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*





Adriana ESTOKOVA<sup>1</sup>  
Michaela SMOLAKOVA<sup>2</sup>  
Alena LUPTAKOVA<sup>3</sup>

## TRENDS OF Co AND Mn LEACHING FROM SLAG MORTARS

Various corrosive agents affect and deteriorate the concrete whereas a release of major components as well as trace elements including heavy metals occurs. Microorganisms tend to colonize solid surfaces in natural environment by forming biofilm as a protective layer, and reducing that the exposure of the solid surface to the external environment. However, biofilm formation could also result in localized corrosion and deterioration of the substratum materials, such as mortars and concrete. Bio corrosion contributes significantly to a deterioration of the concrete structure. The paper aims at investigation of leaching the selected trace metals (cobalt and manganese), from cement mortars of different compositions, during a 180-day bacterial exposure.

**Keywords:** bio-corrosion, heavy metals, blast furnace slag, leaching

### 1. Introduction

The current trend of using secondary fuels for cement production and the use of secondary raw materials in the production of concrete and cement composite materials has drawn attention to leaching of environmentally hazardous substances, in particular toxic heavy metals, from construction of structures exposed to water [1, 2]. Heavy metals in Portland cements in trace amounts occur commonly. Many elements are embedded in clinker matrix during clinker production or immobilized in hydration products of cement [3]. The presence of the heavy metals in the cement is related to the composition of

---

<sup>1</sup> Adriana Estokova, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 042 00 Kosice, Slovakia, +421 55 602 4265, adriana.estokova@tuke.sk

<sup>2</sup> Author for correspondence / autor do korespondencji: Michaela Smolakova, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 042 00 Kosice, Slovakia, +421 55 602 4297, michaela.smolakova@tuke.sk

<sup>3</sup> Alena Luptakova, Slovak Academy of Science, Institute of Geotechnics, Watsonova 45, 043 53 Kosice, Slovakia, +421 55 7922 622, luptakal@saske.sk

input raw materials but also to the used ones fuel, for example, waste materials used as secondary fuels may increase the input of metals into the firing process. According to [4], the heavy metals in the cement can be, depending on their origin, divided into several groups: antimony, manganese and vanadium are dominant of primary raw materials, indicating that for manganese up to 94% of its content in the cement originates in primary raw materials. Zinc and cadmium account for almost one half of their total content in cements to secondary fuels and secondary raw materials. Third group form metals such as cobalt and chromium, giving an equivalent share of secondary and primary raw material on the total metal content of the cement. In the case of cobalt, secondary raw materials from the production of iron and steel, ash, slag, but also secondary fuels, e.g. used tires are of importance. Lead and tin belonging to the fourth group originate almost exclusively from fuels and secondary raw materials. This categorization can also be applied to cements and cement composites while the waste-based admixtures clearly increase heavy metal content. This applies in particular to the blast furnace slag, which has been demonstrated increased content in particular of cadmium, chromium, manganese, tin, thallium and vanadium [4].

The concentration of metals in the clinker also depends on the conditions in the furnace and on the recirculation of metals in the furnace system [5]. The behavior of metals in the furnace system in the manufacture of cement depends on their volatility. Metals and their compounds which are non-volatile emerge from the furnace system in the predominant as part of a cement clinker, such as, for example, chromium and barium. Semi-metals and their compounds, e.g. lead and cadmium pass at sintering temperatures partially into the gas phase and then condense in the cooler portions of the feedstock. Volatile metals and their compounds (lead, thallium) that pass into the gas phase can condense on the raw material, to react with it, creating its own cycles or being emitted with the waste gas out with furnace [5]. The average content of cobalt in Portland cements varies about 10 ppm, manganese about 600 ppm. On the other hand, the content of those metals in cement composites with slag increases up to three times.

The metals present in the cement composites can be mobilised into the surrounding aqueous medium, which act on the material by direct leaching or dissolution and diffusion in the porous liquid. In principle, trace metals are directly leached into water adjacent to concrete surfaces by dissolution of surface phases and/or by dissolution and diffusion in the pore solution, the latter being affected by concrete porosity and pore structure. The solubility of trace metals depends on their bonding in the hydration products and other concrete constituents as well as their ability to form aqueous complexes and precipitate solubility-controlling phases. Thus, as observed by van der Sloot [6] for Cr, Mo, Pb and Zn in mortar, no general correlation exists between the total amount of trace metals and their availability [8].

In addition, microorganisms can play an important role in heavy metals leaching from concrete. In sewer systems, for example, the presence of sulfuric bacteria is linked to a biotic corrosion of concrete [7]. *Acidithiobacillus thiooxidans* bacteria have been shown to play a key role in the process of oxidation of hydrogen sulphide to sulphuric acid and thus contribute to the deterioration of materials [8, 9]. These sulphur-oxidizing microorganisms produce sulphuric acid, which leads to the pH reduce of concrete to 9 or less, and thus to favourable conditions for massive settlement of surfaces with other bacteria [10]. In that case, other degradative chemical processes are also taking place, which can result in excessive release of heavy metals into the environment. Leaching of chromium, barium or cadmium from cement composites has been given attention in many works. This work is dealt with the leaching of less studied heavy metals such as cobalt and manganese, of cement mortars with different blast furnace portions, during 180 days of exposure to bacteria *A. thiooxidans*.

## 2. Material and Methods

Table 1 shows the composition of the mixes used in the experiments. Sample R0 represented the reference sample without any addition of slag, samples S1, S2, S3 and S4 represented the samples with different share of blast furnace slag.

Table 1. Composition of the mortar samples

Tabela 1. Skład próbek zaprawy

Mortar Sample	CEM I	GGBS
	(wt. %)	(wt. %)
R0	100	0
S1	35	65
S2	25	75
S3	15	85
S4	5	95

The prepared cement mortars samples were placed in biotic liquid medium at temperature of 25°C over a period of 180 days. The biotic environment was simulated by *A. thiooxidans*, which was isolated from an acid mine drainage from Pech shaft (locality of Smolnik, Eastern Slovakia). Elemental sulphur was added to the nutrient medium to ensure the growth of bacteria. After placing samples into liquid medium (pH = 4) for the leaching experiment, a chemical composition of concrete samples' leachates and pH of liquid medium were investigated periodically.

X-ray fluorescence analysis (XRF) was used to analyse the chemical composition of leachates. SPECTRO iQ II (Ametek, Germany) with SDD silicon drift detector with resolution of 145 eV at 10 000 pulses was used for the analysis. The primary beam was polarized by Bragg crystal and Highly Ordered Pyrolytic Graphite - HOPG target. The samples were measured during 180 s at voltage of 25 kV and 50 kV at current of 0.5 and 1.0 mA under helium atmosphere by using the standardized method of fundamental parameters for liquids. pH changes were measured by pH meter FG2- FiveGo (Mettler-Toledo, Switzerland) [11].

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. pH evolution

The evolution of pH in samples leachates, during the bio-corrosion experiment is reported in Fig. 1.

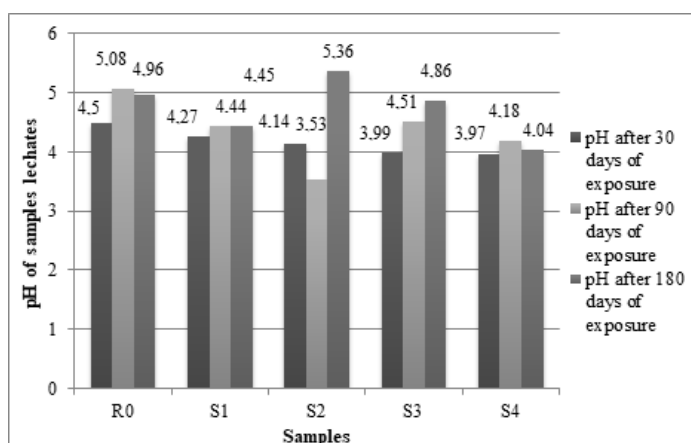


Fig. 1. pH values after the individual periods

Rys. 1. Wartości pH po poszczególnych okresach

As is clear from Fig. 1, the pH in the samples' leachates ranged from 3.53 - 5.36 after the individual leaching periods whereas slightly differed from the original one (pH = 4). The pH changes were connected to two processes: 1) production of the biogenic sulphuric acid by bacterial activity and 2) dissolution of the alkaline components of the cement matrix. The first process tends to decrease in pH values while the second one, on the contrary, to the increase in pH. The measured values after the individual leaching periods documented what process was likely the dominant one. The raise of pH values was observed for all leachates with the exception of sample S2 after 30 days of the experiment.

However, the observed pH values were much lower than those of found of the chemical-based sulphuric acid corrosion [12]. That finding confirmed a different course of biogenic and chemical corrosion as mentioned in [13]. Not considering the S2 sample, the highest pH values were measured for the reference sample R0, indicating the most intensive leaching of the basic components of the cement composite.

### 3.2. Mn and Co concentrations

The occurrence of cobalt in the aquatic environment depends on the pH value of the environment. Above the  $\text{pH} = 6$ , cobalt exists in the form of its stable salts, such as  $\text{CoCO}_3$ ,  $\text{Co(OH)}_2$ , and  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . Under highly alkaline conditions, the cobalt ions are found in the soluble form of the  $\text{HCoO}_2$ . Similarly, in acidic media below  $\text{pH} = 6$  the  $\text{Co}^{2+}$  ions are also present in their soluble compounds. The pH range 3.5 – 5.4, measured in the analysed liquid media, was therefore suitable to dissolve the cobalt compounds and release the cobalt ions into the solution. The measured concentrations of  $\text{Co}^{2+}$  ions in the yields of the individual cement composites are shown in Fig. 2.

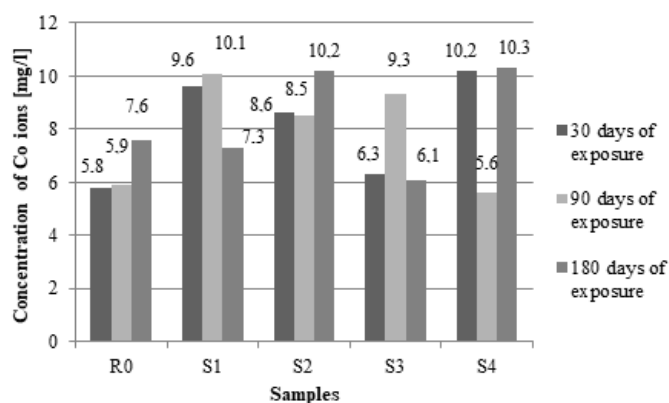


Fig. 2. Leaching trends of  $\text{Co}^{2+}$  ions

Rys. 2. Trendy wypłukiwania jonów  $\text{Co}^{2+}$

The most intensive leaching of Co ions after 180 days was observed for the samples S4 (10.3 mg/L) and S2 (10.2 mg/L), exposed to bacteria (Fig. 2). The highest concentration of  $\text{Co}^{2+}$  ions after 90 days of exposure (10.1 mg/L) was observed for sample S1. Except for the reference sample, no dependence of leached-out quantity of cobalt on the leaching time was observed for any sample. Significant fluctuations in  $\text{Co}^{2+}$  concentrations in the leachates, for individual samples, during the experiment could be likely related to the formation of new compounds in the solution and the incorporation of cobalt into their structure

and subsequent precipitation of those on the surface or in the pores of the composite as is known for calcium compounds. Originally, the cobalt matrix may be present in several hydration products, in particular as sorbate on monosulfate (AFm) or as part of tobermorite [4]. Comparing the measured  $\text{Co}^{2+}$  leached-out quantities regarding the samples composition, the amount of dissolved cobalt do not correlate with the slag content in mortars in any way.

The changes of manganese concentrations in leachates during the 180-day experiment are illustrated in Fig. 3.

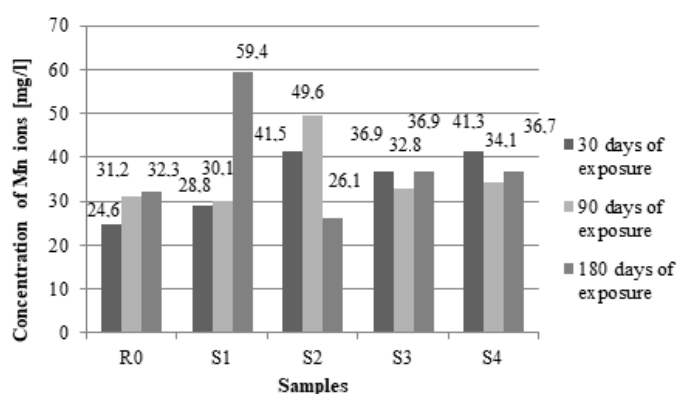


Fig. 3. Leaching trends of Mn ions

Rys. 3. Trendy vyplukiwania jonów Mn

The highest concentration of Mn ions (59.4 mg/L) was measured in leachate of sample S1 after 180 days of bacterial exposure. No correlation of leached-out amounts of manganese versus slag content in cement mortars was found as well.

#### 4. Conclusion

Leaching of major and trace elements is always associated to the degradation of cement paste, due dissolution of the hydration products. Results on the leaching of Co and Mn from cement mortars did not prove any clear relation between the composition of cement mortars and the leaching of the metals mentioned. Since no significant trends of Co and Mn leaching were noticed, it could be interesting to monitor these indicators over a longer period of time.

#### Acknowledgements

The research was supported by the Grant No. 2/0145/15 of the Slovak Grant Agency for Science.

## Bibliography

- [1] Hohberg I. Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen/ Characterization, modelling and assessment of the leaching behaviour of environmentally relevant inorganic compounds from cement based building materials. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Wilhelm Ernst & Sohn, Is. 542, 2003.
- [2] Müllauer W., Beddoe R.E., Heinz D. Leaching behaviour of major and trace elements from concrete: effect of fly ash and GGBS. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 58. pp. 129-139, 2015.
- [3] Magistri M., Recchi P. and Bravo A. Parameters Influencing The Leachability of Antimony From Hardened Concrete. 2013.
- [4] Achternbosch, M. et al.: Heavy metals in cement and concrete resulting from the co-incineration of wastes in cement kilns with regard to the legitimacy of waste utilisation. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH 2003.
- [5] Reference Documents on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries [online]. In: European Commission: May 2010. [ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/clm\\_bref\\_0510.pdf](ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/clm_bref_0510.pdf).
- [6] Van der Sloot H.A. Comparison of the characteristic leaching behavior of cements using standard (EN 196-1) cement mortar and an assessment of their long-term environmental behavior in construction products during service life and recycling. *Cement and Concrete Research* Vol. 30. No 7 pp. 1079-1096, 2000.
- [7] Yoshida N., Morinaga T., Murooka, Y. Characterization and identification of bacterial strains isolated from corroded concrete in the accumulation stratum and their resistance levels to heavy metals. *Journal of fermentation and bioengineering* Vol. 76. No. 5 pp. 400-402, 1993.
- [8] Jensen H.S., Nielsen A.H., Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J. Survival of hydrogen sulfide oxidizing bacteria on corroded concrete surfaces of sewer systems. *Water Science and Technology* Vol. 57. No. 11 pp. 1721-1726, 2008.
- [9] Kelly D.P., Wood A.P. Reclassification of some species of *Thiobacillus* to the newly designated genera *Acidithiobacillus* gen. nov., *Halothiobacillus* gen. nov. and *Thermithiobacillus* gen. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* Vol. 50. No. 2 pp. 511-516, 2000.
- [10] Joseph A.P., Keller J., Bustamante H., Bond P.L. Surface neutralization and H<sub>2</sub>S oxidation at early stages of sewer corrosion: influence of temperature, relative humidity and H<sub>2</sub>S concentration. *Water research* Vol. 46. No. 13 pp. 4235-4245, 2012.
- [11] Jiang G., Wightman E., Donose B.C., Yuan Z., Bond P.L., Keller J. The role of iron in sulfide induced corrosion of sewer concrete. *Water research* Vol. 49, pp. 166-174, 2014.
- [12] Ondrejka Harbulakova V., Stevulova N., Repka M., Luptakova A. Study of different types of corrosion processes simulated in model conditions. *Budownictwo i inzynieria środowiska*. Vol. 59. No. 1 pp. 141-148, 2012.
- [13] Kovalcikova M., Estokova A., Luptakova A. Application of Granulated Blast Furnace Slag in Cement Composites Exposed to Biogenic Acid Attack. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 96. No. 1 pp. 012014, 2015.

**TENDENCJE WYPŁUKIWANIA Co ORAZ Mn ZE SPOIW ŻUŻLOWYCH****Streszczenie**

Różne czynniki korozyjne wpływają i pogarszają beton, podczas gdy występuje uwalnianie różnych składników, w tym metali ciężkich, występuje. Mikroorganizmy mają tendencję do kolonizacji stałych powierzchni w środowisku naturalnym, tworząc biofilm jako warstwę ochronną. Jednakże, tworzenie biofilm może również powodować miejscowe występowanie korozji oraz zniszczenie materiałów podłoża, takich jak zaprawy i betonu. Korozja biologiczna w znacznym stopniu przyczynia się do pogorszenia struktury betonu. Celem pracy jest zbadanie procesu wypłukiwania wybranych metali śladowych (kobaltu i manganu) z zapraw murarskich różnych kompozycji podczas 180-dniowego narażenia na działanie bakterii.

**Słowa kluczowe:** biokorozja, metale ciężkie, żużel wielkopiecowy, wypłukiwanie

*Przesłano do redakcji: 24.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Janusz RAK<sup>1</sup>  
Anna MISZTAŁ<sup>2</sup>

## ANALIZA STRAT WODY W WODOCIĄGU MIASTA JAROSŁAW

Jednym z podstawowych elementów przy ocenie stanu technicznego systemu wodociągowego są straty wody. W związku z tym analiza strat jest jednym z głównych czynników, które należy brać pod uwagę przy planowaniu działań modernizacyjnych i naprawczych, dzięki czemu można osiągnąć zmniejszenie kosztów wiążących się z produkcją i dystrybucją wody. W pracy przedstawiono analizę strat wody w latach 2011 – 2015 dla miasta Jarosław wykonaną dzięki danym uzyskanym z Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji. Wyliczono następujące wskaźniki według International Water Association (IWA): procentowy (WS), jednostkowy start rzeczywistych (RLB), objętości wody niedochodowej (NRWB), start nieuniknionych (UARL), infrastrukturalny indeks wycieków (IL). Dodatkowo obliczono jednostkowe wskaźniki, które pomogą scharakteryzować analizę eksploatacyjną strat wody. Są to wskaźniki takie jak: ilości wody wtłoczonej do sieci, wody sprzedanej ogółem, sprzedanej gospodarstwom domowym, ilości strat wody, wody zużytej na potrzeby własne, wody niedochodowej oraz jednostkowy wskaźnik obciążenia hydraulicznego sieci i strat wody w odniesieniu do całkowitej długości sieci. Ponadto dokonano analizy sieci wodociągowej pod kątem intensywności uszkodzeń, ponieważ awarie przewodów wodociągowych, armatury i przyłączy są jedną z istotnych przyczyn strat wody. Przeanalizowane wyniki w porównaniu do innych miast w Polsce pozwoliły na stwierdzenie, że sieć wodociągowa w Jarosławiu jest w dość dobrym stanie.

**Słowa kluczowe:** system zaopatrzenia w wodę, straty wody, awarie wodociągowe

### 1. Wprowadzenie

Miasto Jarosław zlokalizowane jest we wschodniej części województwa podkarpackiego. Obszar ten to część Kotliny Sandomierskiej oraz Podgórze Rzeszowskie i Płaskowyż Tarnogrodzki. Przecina go rzeka San, która płynie z południowego wschodu na północny zachód, a wzdłuż jej koryta ukształtował się mezoregion zwany Doliną Dolnego Sanu. Miasto jest sie-

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Janusz Rak, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów; tel. 178651449; rakjan@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Anna Miształ, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

dzibą powiatu jarosławskiego. Graniczy ono z takimi gminami jak: Jarosław, Pawłosiów oraz Wiązownica. Zajmuje powierzchnię 34,6 km<sup>2</sup>, a według danych Głównego Urzędu Statystycznego liczba mieszkańców w 2016 roku wynosiła 38 295 osób, co daje gęstość zaludnienia równą 1107 osób na km<sup>2</sup>. Jest to miasto przemysłowo-rolnicze [1].

W 1966 roku zdecydowano się na ujmowanie wody powierzchniowej z rzeki San za pomocą trójkomorowego ujęcie brzegowo-komorowego osiągając wydajność na poziomie 27 000 m<sup>3</sup>/d. Ujęcie to po dziś dzień całkowicie pokrywa zapotrzebowanie na wodę w mieście, a co więcej pozwala na zaopatrywanie okolicznych miejscowości. Sieć wodociągowa doprowadzająca wodę mieszkańcom Jarosławia ma układ pierścieniowo-promienisty i zalicza się do systemu centralnego. Przebiega ona wzdłuż głównych ciągów komunikacyjnych, czyli dróg. Lekko pofałdowane ukształtowanie terenu, pozwoliło na zastosowanie jednostrefowego systemu zasilania. Łączna długość wodociągu wraz z przyłączami w 2015 roku to 231 km [2].

## 2. Analiza strat wody

### 2.1. Wskaźniki strat wody wg International Water Association

Analizę strat wody dla Jarosławia wykonano dzięki danym z Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji oraz na podstawie artykułu [3] wyliczając następujące wskaźniki wg International Water Association (IWA):

- 1) Procentowy wskaźnik strat wody (WS), który określa udział strat w stosunku do ilości wody wtłoczonej.

$$WS = \frac{V_{str}}{V_{wtł}} \cdot 100\%, [\%] \quad (1)$$

gdzie:

WS – procentowy wskaźnik strat wody, [%],

$V_{str}$  – straty wody, [m<sup>3</sup>/rok],

$V_{wtł}$  – objętość wody wtłoczonej do sieci, [m<sup>3</sup>/rok].

W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń procentowego wskaźnika strat wody wraz z niezbędnymi danymi.

- 2) Wskaźnik jednostkowy strat rzeczywistych (RLB), który opisuje rzeczywistą ilość strat wody w stosunku do liczby przyłączy wodociągowych. Wskaźnik ten stosuje się w dwóch wariantach:
  - pierwsze zastosowanie dotyczy ilości podłączeń wodociągowych mniejszych od 20 na jeden kilometr sieci (M+R),

Tabela 1. Procentowy wskaźnik strat wody (WS)

Table 1. Percentage loss of water (WS)

Rok	Straty wody, $V_{str}$ [m <sup>3</sup> /rok]	Objętość wody wtłoczonej do sieci, $V_{wt}$ [m <sup>3</sup> /rok]	WS [%]
2011	500670,00	2593470,00	19,31
2012	512700,00	2597600,00	19,74
2013	603390,00	2459300,00	24,54
2014	686870,00	2438600,00	28,17
2015	650380,00	2380200,00	27,32

$$RLB_1 = \frac{V_{str}}{(M + R) \cdot 365} \left[ \frac{m^3}{km \cdot d} \right] \quad (2)$$

gdzie:

M – długość sieci magistralnej, [km],

R – długość sieci rozdzielczej, [km].

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń jednostkowego wskaźnika strat rzeczywistych  $RLB_1$  wraz z niezbędnymi danymi.

Tabela 2. Wskaźnik jednostkowy strat rzeczywistych  $RLB_1$ Table 2. Real leakage balans  $RLB_1$ 

Rok	Straty wody, $V_{str}$ [m <sup>3</sup> /rok]	Długość sieci ma- gistralnej, M [km]	Długość sieci roz- dzielczej, R [km]	$RLB_1$ [m <sup>3</sup> /km · d]
2011	500670,00	9,0	109,1	11,61
2012	512700,00	9,0	109,7	11,83
2013	603390,00	9,0	109,9	13,90
2014	686870,00	9,0	110,3	15,77
2015	650380,00	9,0	110,9	14,86

- drugie zastosowanie dotyczy ilości podłączeń co najmniej równych 20 na jednym kilometrze sieci wodociągowej (M+R).

$$RLB_2 = \frac{V_{str} \cdot 1000}{L_{pw} \cdot 365} \left[ \frac{dm^3}{d \cdot \text{podłączenie wod.}} \right] \quad (3)$$

gdzie:

$L_{pw}$  – liczba podłączeń wodociągowych, [-].

W tabeli 3 przedstawiono wyniki obliczeń jednostkowego wskaźnika strat rzeczywistych  $RLB_2$  wraz z niezbędnymi danymi.

Tabela 3. Wskaźnik jednostkowy strat rzeczywistych RLB<sub>2</sub>Table 3. Real leakage balans RLB<sub>2</sub>

Rok	Straty wody, V <sub>str</sub> [m <sup>3</sup> /rok]	Liczba połączeń wodociągowych, L <sub>pw</sub> [-]	RLB <sub>2</sub> [dm <sup>3</sup> /d · połączenie wod.]
2011	500670,00	5101	268,91
2012	512700,00	5160	272,22
2013	603390,00	5208	317,42
2014	686870,00	5256	358,04
2015	650380,00	5309	335,63

3) Wskaźnik objętości wody niedochodowej (NRWB) mówi o ilości wody niesprzedanej, czyli różnicy pomiędzy wyprodukowaną wodą a sprzedaną.

$$NRWB = \frac{V_{wtł} - V_{sp}}{V_{wtł}} \cdot 100\%, [\%] \quad (4)$$

gdzie:

V<sub>sp</sub> – woda sprzedana, [m<sup>3</sup>/rok].

W tabeli 4 zestawiono dane potrzebne do obliczeń oraz wyniki wskaźnika NRWB dla Jarosławia.

Tabela 4. Wskaźnik objętości wody niedochodowej

Table 4. Non-revenue water basic

Rok	Objętość wody wtłoczonej do sieci, V <sub>wtł</sub> [m <sup>3</sup> /rok]	Woda sprzedana, V <sub>sp</sub> [m <sup>3</sup> /rok]	NRWB [%]
2011	2593470,00	2092800,00	19,31
2012	2597600,00	2084900,00	19,74
2013	2459300,00	1946000,00	20,87
2014	2438600,00	1842300,00	24,45
2015	2380200,00	1856600,00	22,00

4) Wskaźnik strat nieuniknionych (UARL) pozwala na wyznaczenie nieuniknionych strat wody w sieci wodociągowej, czyli np. wycieki poniżej 0,5 m<sup>3</sup>/h, które są bardzo trudne zarówno do zlokalizowania jak i wykrycia. Na podstawie poniższych składników można określić roczną objętość wody wodociągowej w postaci strat nieuniknionych:

- przyjmuję się wycieki nieuniknione równe 18 dm<sup>3</sup>/km·d·1m H<sub>2</sub>O ciśnienia na rurociągach rozdzielczych i magistralnych,

- 25 dm<sup>3</sup>/1m połączeń·d·1m H<sub>2</sub>O ciśnienia nieuniknionych wycieków wody na przewodach połączeń wodociągowych,
- wycieki nieuniknione wiążące się z ilością połączeń zakłada się w wielkości 0,8 dm<sup>3</sup>/1 połączenie·d·1m H<sub>2</sub>O ciśnienia.

$$U\text{ARL} = [18 \cdot (M + R) + 25 \cdot PW + 0,8 \cdot L_{pw}] \cdot 0,365 \cdot p, [m^3/\text{rok}] \quad (5)$$

gdzie:

PW – długość połączeń wodociągowych, [km],

L<sub>pw</sub> – liczba połączeń wodociągowych, [-],

p – średnie ciśnienie w rozpatrywanej strefie pomiarowej, [mH<sub>2</sub>O], p = 45 [mH<sub>2</sub>O]

W tabeli 5 zestawiono dane potrzebne do obliczeń oraz wyniki obliczeń wskaźnika strat nieuniknionych dla miasta Jarosławia w latach 2011 -2015.

Tabela 5. Wskaźnik strat nieuniknionych

Table 5. Unavoidable real leakage

Rok	Długość sieci magistralnej, M [km]	Długość sieci rozdzielczej, R [km]	Długość połączeń wodociągowych, PW [km]	Liczba połączeń, L <sub>pw</sub> [-]	UARL [m <sup>3</sup> /rok]
2011	9,0	109,1	95,0	5101	140952,78
2012	9,0	109,7	96,0	5160	142316,06
2013	9,0	109,9	98,4	5208	143991,41
2014	9,0	110,3	100,0	5256	145397,39
2015	9,0	110,9	111,1	5309	150829,13

5) Infrastrukturalny indeks wycieków (ILI) – jest wielkością bezwymiarową określającą stosunek objętości rzeczywistych strat wody wodociągowej do strat nieuniknionych.

$$ILI = \frac{V_{str}}{U\text{ARL}}, [-] \quad (6)$$

W tabeli 6 przedstawiono wyniki obliczeń wskaźnika ILI dla miasta Jarosław wraz z potrzebnymi danymi.

Tabela 6. Infrastrukturalny indeks wycieków

Table 6. Infrastructure leakage index

Rok	Straty wody, $V_{str}$ [m <sup>3</sup> /rok]	UARL [m <sup>3</sup> /rok]	ILI [-]
2011	500670,00	140952,78	3,6
2012	512700,00	142316,055	3,6
2013	603390,00	143991,405	4,2
2014	686870,00	145397,385	4,7
2015	650380,00	150829,1325	4,3

## 2.2. Analiza strat wody wodociągowej w Jarosławiu

International Water Association oferuje cztery metody postępowania: aktywną kontrolę wycieków, regulację i kontrolę ciśnienia, jakość i szybkość napraw, odnowę, konserwację oraz wymianę przewodów [4].

Straty wody są przede wszystkim wynikiem złego stanu technicznego przewodów wodociągowych oraz armatury. W dużej mierze chodzi tutaj o typowe nieszczelności na połączeniach powodujące wycieki o różnym natężeniu. Jednak należy także wziąć pod uwagę oprócz rzeczywistych strat wody tzw. straty pozorne. Związane są one np. z błędami urządzeń pomiarowych, błędnym oszacowaniem ilości wody zużytej do płukania sieci oraz stosowanie niemiarodajnego ryczałtowego rozliczania za wodę [5].

Poniższa tabela 7 zawiera zakresy wartości współczynnika Infrastructure Leakage Index oraz przypisany im opis mówiący o stanie sieci wodociągowej.

Tabela 7. Kategorie wartości współczynnika ILI

Table 7. Coefficient values of ILI

Zakres ILI	Stan
$ILI \leq 1,5$	Bardzo dobry
$1,5 < ILI \leq 2,0$	Dobry
$2,0 < ILI \leq 2,5$	Średni
$2,5 < ILI \leq 3,0$	Słaby
$3,0 < ILI \leq 3,5$	Bardzo słaby
$ILI > 3,5$	Niedopuszczalny

Porównując zakresy współczynnika ILI zawarte w tabeli 7 z wartościami współczynnika ILI wyliczonego dla miasta Jarosław (tabela 6) można stwierdzić, że stan techniczny sieci wodociągowej jest niedopuszczalny. Współczyn-

nik ten ma tendencję wyraźnie rosnąć i we wszystkich analizowanych latach przekracza on wartość 3,5. Najwięcej wyniósł on w roku 2014, czyli 4,7. Jednak zakres wartości współczynnika ILI zaproponowany przez IWA dotyczy krajów wysokorozwiniętych. Natomiast wg WBI Banding System wartości od 5,8 do 4,3 są oceniane jako stan słaby, a dla rozwijających się krajów jako stan dobry. Tymczasem Amerykańskie Stowarzyszenie Wodne (AWWA) proponuje przyjęcie wartości niższych niż 5,0 jako dobry stan sieci oraz wartości większych od 5,0 jako słaby stan sieci. Wartości infrastrukturalnego indeksu wycieków w miastach Polski wahają się między 3,16 a 16,62 [3]. Z powyższych podziałów można wywnioskować iż wodociągi w mieście Jarosław są na dość zadowalającej pozycji. Na rysunku 1 przedstawiono wykres zmian wskaźnika ILI, do którego program wygenerował prostą wraz z równaniem oraz współczynnik korelacji równy  $R^2 = 0,7066$ . Jak widać wzrost wskaźnika w latach 2011 – 2014 o 25% świadczy o złym stanie technicznym sieci, nieefektywnym zarządzaniu, nieodpowiednim planowaniu strategii dotyczących odnowy, konserwacji oraz wymiany przewodów. Według danych Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Jarosławiu w latach 2011 – 2015 zostało wymienione w sumie tylko 5 km sieci. Przy czym w roku 2012 i 2013 nie zanotowano żadnej wymiany przewodów wodociągowych na nowsze lub zmiany materiału w miejscach gdzie nadal znajduje się azbestocement.

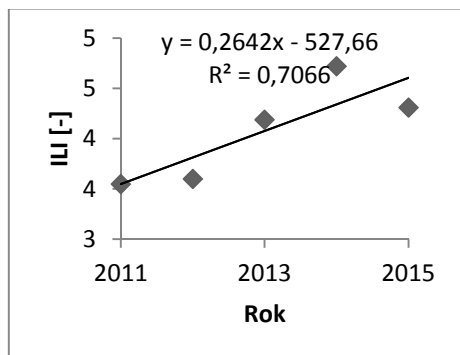
Na rysunkach 1, 2, 3 oraz 4 przedstawiono wykresy zależności poszczególnych wskaźników opisujących starty w wody w sieci wodociągowej.

Tabela numer 8 zawiera wyniki obliczonych wskaźników strat wody w mieście Jarosław w latach 2011 – 2015.

Tabela 8. Wskaźniki strat wody

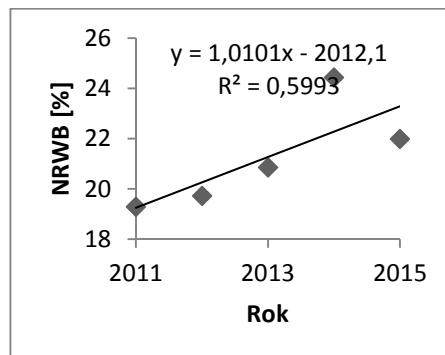
Table 8. Water loss indicators

Rok	WS [%]	RLB <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> /km · d]	RLB <sub>2</sub> [dm <sup>3</sup> /d · podłączenie wod.]	NRWB [%]	UARL [m <sup>3</sup> /rok]	ILI [-]
2011	19,31	11,61	268,91	19,31	140952,78	3,6
2012	19,74	11,83	272,22	19,74	142316,06	3,6
2013	24,54	13,90	317,42	20,87	143991,41	4,2
2014	28,17	15,77	358,04	24,45	145397,39	4,7
2015	27,32	14,86	335,63	22,00	150829,13	4,3



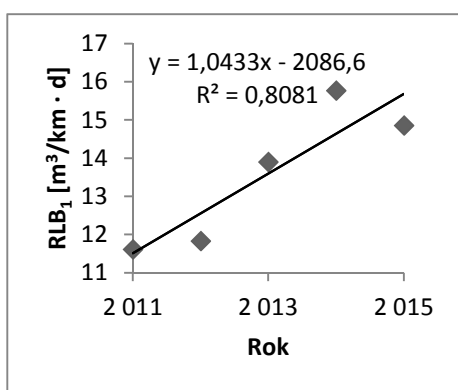
Rys. 1. Infrastrukturalny wskaźnik wycieków w mieście Jarosław

Fig. 1. Infrastructure leakage index in the city of Jaroslavia



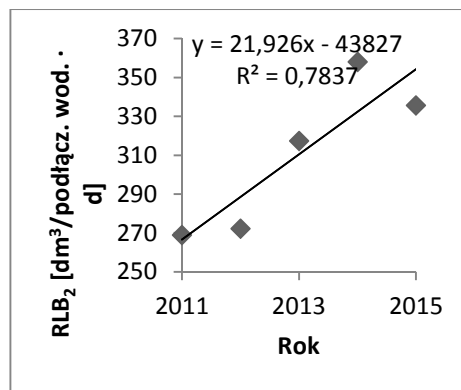
Rys. 2. Wskaźnik objętości wody niedochodowej w mieście Jarosław

Fig. 2. Non-revenue water basic in the city of Jaroslavia



Rys. 3. Jednostkowe straty rzeczywiste RLB<sub>1</sub> w mieście Jarosław

Fig. 3. Real leakage balans RLB<sub>1</sub> in the city of Jaroslavia



Rys. 4. Jednostkowe straty rzeczywiste RLB<sub>2</sub> w mieście Jarosław

Fig. 4. Real leakage balans RLB<sub>2</sub> in the city of Jaroslavia

Ważnym wskaźnikiem, który pozwala określić efektywność zarządzania systemem wodociągowym na danym obszarze są roczne straty wody. Wartość średnia procentowego wskaźnika start wody dla Jaroslavia, na podstawie tabeli nr 8, wynosi 23,81%. Tendencję rosnącą wykazuje wskaźnik objętości wody niedochodowej, choć w okresie podjętym analizą jego wartość nie jest stabilna, co można zauważyć na rysunku 2. Również straty rzeczywiste wyrażone zarówno w  $\text{m}^3/\text{km} \cdot \text{d}$  jak i  $\text{dm}^3/\text{d} \cdot \text{podłączenie wod.}$  z roku na rok konsekwentnie zwiększają swoją wartość, co wyraźnie widać na rysunku 3, 4. Na wymienionych rysunkach przedstawiono wykres zmian danych wskaźników, do którego program wygenerował prostą wraz z równaniem oraz współczynnik korelacji.



### 2.3. Jednostkowe wskaźniki strat wody w wodociągu

Aby dobrze scharakteryzować analizę eksploatacyjną strat wody wodociągowej w Jarosławiu posłużono się następującymi jednostkowymi wskaźnikami [3]:

1) jednostkowa ilość wody wtłoczonej do sieci:

$$q_{wtł} = \frac{V_{wtł} \cdot 1000}{LM \cdot 365}, \left[ \frac{dm^3}{Mk \cdot d} \right] \quad (7)$$

2) jednostkowa ilość wody sprzedanej ogółem:

$$q_{sp} = \frac{V_{sp} \cdot 1000}{LM \cdot 365}, \left[ \frac{dm^3}{Mk \cdot d} \right] \quad (8)$$

3) jednostkowa ilość wody sprzedanej gospodarstwom domowym:

$$q_{spgd} = \frac{V_{spgd} \cdot 1000}{LM \cdot 365}, \left[ \frac{dm^3}{Mk \cdot d} \right] \quad (9)$$

4) jednostkowa ilość strat wody:

$$q_{str} = \frac{V_{str} \cdot 1000}{LM \cdot 365}, \left[ \frac{dm^3}{Mk \cdot d} \right] \quad (10)$$

5) jednostkowa ilość wody zużytej na potrzeby własne:

$$q_{wt} = \frac{V_{wt} \cdot 1000}{LM \cdot 365}, \left[ \frac{dm^3}{Mk \cdot d} \right] \quad (11)$$

6) jednostkowa ilość wody niedochodowej:

$$q_{nd} = \frac{(V_{wtł} - V_{sp}) \cdot 1000}{LM \cdot 365}, \left[ \frac{dm^3}{Mk \cdot d} \right] \quad (12)$$

Tabela numer 9 przedstawia zestawienie obliczeń jednostkowych wskaźników ilości wody w Jarosławiu w latach 2011 – 2015

Tabela 9. Jednostkowe wskaźniki ilości wody

Table 9. Individual indicators quantity of water

Rok	LM	$V_{spgd}$ [m <sup>3</sup> /rok]	$V_{wt}$ [m <sup>3</sup> /rok]	$\frac{q_{wtł}}{[Mk \cdot d]}$ [ $\frac{dm^3}{Mk \cdot d}$ ]	$\frac{q_{sp}}{[Mk \cdot d]}$ [ $\frac{dm^3}{Mk \cdot d}$ ]	$\frac{q_{spgd}}{[Mk \cdot d]}$ [ $\frac{dm^3}{Mk \cdot d}$ ]	$\frac{q_{str}}{[Mk \cdot d]}$ [ $\frac{dm^3}{Mk \cdot d}$ ]	$\frac{q_{wt}}{[Mk \cdot d]}$ [ $\frac{dm^3}{Mk \cdot d}$ ]	$\frac{q_{nd}}{[Mk \cdot d]}$ [ $\frac{dm^3}{Mk \cdot d}$ ]
2011	43242	1267000	322130	164,32	132,60	80,27	31,72	20,41	31,72
2012	43002	1286400	338400	165,50	132,83	81,96	32,66	21,56	32,66
2013	44082	1239500	276810	152,85	120,95	77,04	37,50	17,20	31,90
2014	43774	1118100	275830	152,63	115,31	69,98	42,99	17,26	37,32
2015	43331	1137000	251320	150,49	117,39	71,89	41,12	15,89	33,11

Patrząc na zestawienie jednostkowych wskaźników strat wody w wodociągach zawarte w tabeli 9 stwierdzono, że wskaźnik wody wtłoczonej waha się od wartości 165,50 dm<sup>3</sup>/Mk · d do 150,49 dm<sup>3</sup>/Mk · d. Natomiast jednostkowa ilość wody sprzedanej wynosi najwięcej dla roku 2012 i jest to 132,83 dm<sup>3</sup>/Mk · d, a najmniej dla roku 2014 – 115,31 dm<sup>3</sup>/Mk · d. Jednostkowa objętość sprzedanej wody gospodarstwom domowym mieści się w granicach od 71,89 dm<sup>3</sup>/Mk · d do 81,96 dm<sup>3</sup>/Mk · d. Jeżeli odniesiemy te wartości do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 roku w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody to zauważymy, że odpowiadają one mieszkaniom wyposażonym w wodociąg, zlew kuchenny i wc, ale bez łazienki i ciepłej wody, co w dzisiejszych czasach nie ma odzwierciedlenia w rzeczywistości miasta Jarosław. Z powyższej tabeli 9 wynika także, że jednostkowy wskaźnik strat wody wynosi od 31,72 dm<sup>3</sup>/Mk · d do 42,99 dm<sup>3</sup>/Mk · d, jednostkowa objętość wody potrzebnej na cele własne waha się między 15,89 dm<sup>3</sup>/Mk · d, a 21,56 dm<sup>3</sup>/Mk · d oraz ilość wody niedochodowej mieści się w granicach 31,72 – 37,32 dm<sup>3</sup>/Mk · d.

7) jednostkowy wskaźnik obciążenia hydraulicznego sieci:

$$q_o = \frac{V_{wtł}}{L_{M+R} \cdot 365} \left[ \frac{m^3}{km \cdot d} \right] \quad (13)$$

8) wskaźnik jednostkowy strat wody w odniesieniu do całkowitej długości sieci:

$$q_{strL} = \frac{V_{str}}{L \cdot 365} \left[ \frac{m^3}{km \cdot d} \right] \quad (14)$$

$$V'_{str} = V_{str} - U_{ARL}, \left[ \frac{m^3}{rok} \right] \quad (15)$$

$$q'_{str.L} = \frac{V'_{str}}{L \cdot 365} \left[ \frac{m^3}{km \cdot d} \right] \quad (16)$$

Tabela numer 10 przedstawia zestawienie obliczonych wskaźników obniżenia hydraulicznych sieci wodociągowej w Jarosławiu w latach 2011 – 2015.

Tabela 10. Jednostkowe wskaźniki obciążeń hydraulicznych sieci wodociągowej

Table 10. Individual indicators hydraulic loads of water supply

Rok	L [km]	$q_o$ [m <sup>3</sup> /km·d]	$q_{strL}$ [m <sup>3</sup> /km·d]	$V'_{str}$ [m <sup>3</sup> /rok]	$q'_{str.L}$ [m <sup>3</sup> /km·d]
2011	213,10	60,16	6,44	359717,22	4,62
2012	214,70	59,96	6,54	370383,95	4,73
2013	217,30	56,67	7,61	459398,60	5,79
2014	219,30	56,00	8,58	541472,62	6,76
2015	231,00	54,39	7,71	499550,87	5,92

Analizując tabelę nr 10 widać, iż jednostkowy wskaźnik obciążenie hydraulicznego w latach 2011 – 2015 zmniejszył się z wartości 50,16 m<sup>3</sup>/km·d do wartości 54,39 m<sup>3</sup>/km·d. Tymczasem wskaźnik jednostkowy strat dotyczących całkowitej długości sieci waha się w przedziale od 6,44 m<sup>3</sup>/km·d do 8,58 m<sup>3</sup>/km·d.

### 3. Awaryjność sieci wodociągowej Jarosławia

Korzystając z poniższych wzorów obliczono trzy współczynniki, które pomogą scharakteryzować sieć wodociągową a ich znajomość jest bardzo przydatna i powinna być znana eksploatacjom [6]:

$$L_{pśr} = \frac{PW}{L_{pw}} \left[ \frac{m}{1 \text{ podłączenie}} \right] \quad (17)$$

gdzie:

$L_{pśr}$  – średnia długość podłączenia wodociągowego, [m/1 podłączenie],

$PW$  – długość podłączeń wodociągowych, [m],

$L_{pw}$  – liczba podłączeń wodociągowych, [-].

$$l = \frac{L_{pw}}{R} \left[ \frac{\text{szt.}}{\text{km}} \right] \quad (18)$$

gdzie:

$l$  – liczba podłączeń przypadająca na 1 km sieci rozdzielczej, [szt./km],

$R$  – długość sieci rozdzielczej, [km].

$$q = \frac{Q_{d\text{sr}}}{L} \left[ \frac{m^3}{d \cdot km} \right] \quad (19)$$

gdzie:

$q$  – współczynnik obciążenia sieci, [ $m^3/d \cdot km$ ],

$Q_{d\text{sr}}$  – średnie dobowe zużycie wody w roku, [ $m^3/d$ ],

$L$  – całkowita długość sieci wodociągowej, [km].

W tabeli 11 przedstawiono wyniki obliczeń współczynników charakteryzujących sieć wodociągową.

Tabela 11. Zestawienie współczynników opisujących sieć wodociągową

Table 11. Summary of indicators describing the water supply

Rok	Średnia długość podłączenia wodociągowego, $L_{p\text{sr}}$ [m/1 podłączenie]	Liczba podłączeń przypadająca na 1 km sieci rozdzielczej, $l$ [szt./km]	Współczynnik obciążenia sieci, $q$ [ $m^3/d \cdot km$ ]
2011	1,86	46,76	26,91
2012	1,86	47,04	26,60
2013	1,89	47,39	24,54
2014	1,90	47,65	23,02
2015	2,09	47,87	22,02

Jak widać na podstawie tabeli 11 pomimo rosnącej średniej długości podłączenia wodociągowego i liczby podłączeń, współczynnik obciążenia sieci maleje. Ma to prawdopodobnie związek z ciągle zmniejszającym się zużyciem wody. Standardy europejskie mówią, że powinniśmy dążyć do następujących wartości kryterialnych intensywności uszkodzeń rurociągów [7]:

- przewody tranzytowe i magistralne – przyjmują się  $\lambda = 0,3$  uszk./( $km \cdot rok$ ),
- przewody sieci rozdzielczej –  $\lambda = 0,5$  uszk./( $km \cdot rok$ ),
- na podłączeniach domowych zaleca się  $\lambda = 1,0$  uszk./( $km \cdot rok$ ).

Intensywność uszkodzeń można wyliczyć na podstawie poniższego wzoru biorąc pod uwagę długość analizowanej sieci (w odniesieniu do 1 km), liczbę awarii oraz jednostkę czasu.

$$\lambda = \frac{k}{L \cdot \Delta t} \left[ \frac{1}{km \cdot rok} \right] \quad (20)$$

gdzie:

$k$  – liczba awarii na poszczególnych sieciach wodociągowych, [-],

$L$  – długość sieci wodociągowej, [km],

$\Delta t$  – przedział czas, podczas którego ilość rozpatrywanych awarii miała miejsce, [rok].

Tabela 12 przedstawia wyniki obliczeń intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej  $\lambda$  [1/(km · rok)] miasta Jarosław w latach 2011 – 2015

Tabela 12. Zestawienie intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej  $\lambda$

Table 12. Summary of the water supply system failure rate  $\lambda$

Oznaczenie	Rok				
	2011	2012	2013	2014	2015
Liczba awarii na sieci magistralnej $\lambda_M$	0	3	2	0	0
Intensywność uszkodzeń $\lambda_M$	<b>0</b>	<b>0,33</b>	<b>0,22</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Liczba awarii na sieci rozdzielczej $\lambda_R$	44	70	55	42	30
Intensywność uszkodzeń $\lambda_R$	<b>0,40</b>	<b>0,64</b>	<b>0,50</b>	<b>0,38</b>	<b>0,27</b>
Liczba awarii podłączeń wodociągowych $\lambda_{PW}$	35	55	31	49	41
Intensywność uszkodzeń $\lambda_{PW}$	<b>0,37</b>	<b>0,57</b>	<b>0,32</b>	<b>0,49</b>	<b>0,37</b>
Całkowita liczba awarii sieci wodociągowej $\lambda_C$	79	128	88	91	71
Intensywność uszkodzeń $\lambda_C$	<b>0,37</b>	<b>0,60</b>	<b>0,40</b>	<b>0,41</b>	<b>0,31</b>

Analizując wartości intensywności uszkodzeń sieci w Jarosławiu przedstawione w tabeli 12 widać, że jej średnia wartość ( $\lambda_C$ ) w analizowanym okresie pięciu lat wynosi 0,42 uszk./(km·rok). Biorąc pod uwagę sieć magistralną to awarie zostały odnotowane jedynie w 2012 oraz 2013 roku, a intensywność uszkodzeń w tych latach wynosi odpowiednio 0,33 uszk./(km·rok) i 0,22 uszk./(km·rok), co nie przewyższa wartości uznawanej za kryterialną. Przy rozpatrywaniu sieci rozdzielczej stwierdzono, że wartość kryterialna została przekroczona jedynie w 2012 roku, gdzie intensywność uszkodzeń wyniosła 0,64 uszk./(km·rok). Natomiast najniższy wskaźnik zanotowano dla tej sieci zanotowano w 2015 roku: 0,27 uszk./(km·rok). Jeżeli chodzi o podłączenia wodociągowe to najniższa intensywność uszkodzeń była w roku 2013, kiedy wartość ta wyniosła 0,32 uszk./(km·rok), a największa miała miejsce w 2012 roku – 0,57 uszk./(km·rok) i jest ona niższa od wartości kryterialnej standardów europejskich.

#### 4. Podsumowanie

Straty wody w latach 2011 – 2015 mieszczą się w przedziale: od 500 670,00 m<sup>3</sup> do 686 870,00 m<sup>3</sup>. Wartość średnia procentowego wskaźnika strat wody jest równa 23,81%. Stan techniczny sieci wodociągowej w roku 2015 wg IWA określany jest jako niedopuszczalny. Infrastrukturalny indeks wycieków dla Jarosławia zawiera się w przedziale od 3,6 do 4,7 jednak biorąc pod uwagę skale WBI Banding System oraz Amerykańskiego Stowarzyszenia Wodnego, a także porównując go z innymi miastami Polski znajduje się on na dość dobrym poziomie. Analizując wartości intensywności uszkodzeń to jej średnia wynosi 0,42 uszk./(km · rok). Na tej podstawie można stwierdzić, że awarie na sieci wodociągowej nie mają dużego wpływu na straty wody.

## Literatura

- [1] „Lokalny Plan Rewitalizacji Obszaru Miejskiego Jarosławia na lata 2009 - 2015”, Jarosław 2009.
- [2] Materiały z Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Jarosławiu.
- [3] Rak J., Sypień Ł., „Analiza strat wody w wodociągu miasta Jasła”, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXX, z. 60 (3/13), lipiec – wrzesień 2013, str. 5-18, DOI:10.7862/rb.2013.33.
- [4] Musz-Pomorska A., Iwanek M., Suchorab P., Brodaczevska A., „Analiza strat wody na przykładzie wybranego wodociągu grupowego”, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (2/I/16), kwiecień-czerwiec 2016, str. 179-189, DOI:10.7862/rb.2016.120.
- [5] Kwietniewski M., „Zastosowanie wskaźników strat wody do oceny efektywności jej dystrybucji w systemach wodociągowych”, Ochrona Środowiska, tom 35, nr 4, 2013, str. 9-16.
- [6] Rak J., „Problematyka ryzyka w wodociągach”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2014.
- [7] Tchrzewska-Cieślak B., Rak J., „Awaryjność sieci wodociągowych w głównych miastach Doliny Sanu”, III Konferencja Naukowo-Techniczna "Błękitny San", Dubiecko, 21-22 kwietnia 2006, str. 113-123.

## ANALYSIS OF THE WATER LOSSES IN THE JAROSŁAW CITY

### Summary

One of the basic elements in assessing the technical condition of the water supply system is the loss of water. Therefore, loss analysis is one of the main factors to be considered in planning modernization and corrective actions, thus reducing the costs associated with the production and distribution of water. The work presents an analysis of water losses in the years 2011 - 2015 for the city of Jarosław made thanks to the data obtained from the Water Supply and Sewerage Company. The following International Water Association (IWA) indicators have been calculated: percentage (WS), real leakage balans (RLB), non-revenue water basic (NRWB), unavoidable real leakage (UARL), infrastructure leakage index (ILI). In addition, individual indicators were calculated to help characterize the exploitation analysis of water losses. These are indicators such as the amount of water injected into the net, the total water sold to households, the amount of water loss, the water used for own consumption, the non-profit water and the unit load index of the hydraulic network and the water loss with respect to the total network length. The water supply network was analyzed for damage intensity because of water supply failure, fittings And the connections are one of the major causes of water loss. The analyzed results Compared to other cities in Poland, it was possible to conclude that the water-line network in Jaroslaw was in good shape.

**Keywords:** water supply system, losses in water, water pipe failure

*Przesłano do redakcji: 17.10.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Anna DUDZIŃSKA<sup>1</sup>

## ANALIZA WPLYWU POWIERZCHNI PRZEGRÓD PRZEZROCZYSTYCH NA MIKROKLIMAT PASYWNEGO BUDYNKU UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ

Publikacja zawiera informacje dotyczące wpływu powierzchni przegród przezroczystych na mikroklimat budynku pasywnego. Przeprowadzono pięć symulacji pozwalających na określenie w jakim stopniu rozkład stolarki okiennej jest w stanie zmienić warunki środowiskowe we wnętrzu, wybranego z całego obiektu, pomieszczenia do analizy i wpłynąć na ograniczenie przegrzewania latem. Usuwano o 50% i 100% powierzchni okna na elewacji południowej i północnej. W symulacjach nie uwzględniano innych możliwości związanych z minimalizacją nadmiernych zysków solarnych takich jak rodzaj zastosowanych osłon przeciwsłonecznych, nocne przewietrzanie, wpływ masy termicznej czy też kontrola wilgotności i ruchu powietrza. W związku z wąskim zakresem analizy, rozbieżności w wynikach są niewielkie, pozwalają jednak na sformułowanie wstępnych wniosków. Południowe elewacje szklone przede wszystkim wpływają na wartości temperatury powietrza wewnętrznego i wskaźnik przewidywanej oceny średniej. Wariant, w którym zredukowano powierzchnie transparentne na elewacji południowej o 100% wykazał najmniejszą wartość wskaźnika przewidywanej oceny średniej. Duże ilości promieniowania słonecznego, przenikającego przez spore powierzchnie transparentne po stronie południowej, są powodem dyskomfortu. Okna północne w mniejszym stopniu przyczyniają się do obniżenia zysków solarnych, w porównaniu z południowymi. Projektowanie przeszkleń nie może być przesadzone w żadną ze stron. Zbyt duże powierzchnie przeszklone mogą być nie tylko powodem strat ciepła w zimie, ale też przyczyną przegrzewania latem. Zapewnienie właściwego mikroklimatu w danym środowisku gwarantuje efektywność wykonywanych zadań i zdrowie użytkowników dlatego powinno być kluczową kwestią w projektowaniu.

**Słowa kluczowe:** komfort cieplny, PMV, przegrzewanie, przeszkleńia

### 1. Wprowadzenie

Dążąc do zapewnienia komfortu cieplnego w budynku, poszukuje się uzasadnionych ekonomicznie, różnych rozwiązań konstrukcyjnych. Wielkość

---

<sup>1</sup> Anna Dudzińska, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Zakład Budownictwa i Fizyki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska

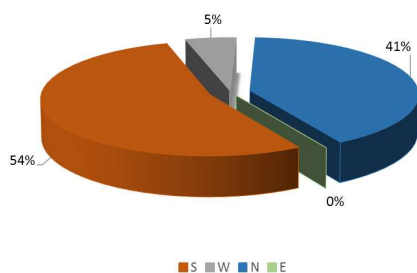
oraz rozmieszczenie przegród przezroczystych jest jednym z elementów kształtujących mikroklimat wnętrza. Przenikające przez powierzchnie przezroczyste promieniowanie słoneczne jest źródłem zysków ciepła, wpływających na dyskomfort użytkowników. W sezonie grzewczym zyski od promieniowania są jak najbardziej pożądane i uwzględniane na etapie projektowania budynków pasywnych. W sezonie letnim zyski te stają się poważnym utrudnieniem, prowadzącym często do przegrzewania pomieszczeń.

Wymagania dotyczące izolacyjności cieplnej okien zostały określone w rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [1]. Określenie współczynnika przenikania ciepła dla powierzchni przezroczystych nie odzwierciedla rzeczywistych ilości ciepła, przenikającego przez przegrodę. Istotne jest racjonalne ulokowanie okien w zależności od usytuowania przegrody względem strony świata.

## 2. Charakterystyka modelu hali sportowej

Poddana analizie hala sportowa w Słomnikach jest istniejącym obiektem, którego powierzchnie szklone skierowane są w kierunku północnym oraz południowym. Na elewacji południowej znajduje się największy procent przeszklenia i tam też generowane są najwyższe zyski słoneczne. Budynek spełnia wymagania warunków technicznych w kwestii stosunku powierzchni okien do powierzchni podłogi oraz współczynnika redukcji promieniowania  $f_c$ .

Procentowy stosunek powierzchni przeszklonych w konfrontacji z usytuowaniem względem stron świata zobrazowano na rysunku 1.



Rys. 1. Procentowy udział poszczególnych orientacji przeszklenia w hali

Fig. 1. Percentage orientation glazing in the hall

Powierzchnia użytkowa budynku wynosi ok  $1755 \text{ m}^2$ , a powierzchnie okien zajmują  $213,77 \text{ m}^2$ . Hala spełnia wymagania stawiane przegrodom przezroczystym, zawarte w §57 rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [1]. W analizach nie uwzględniono wpływu redukcji okien poszczególnych elewacji na wymogi warunków technicznych.



W celu określenia wielkości wpływu przeszklenia na mikroklimat w budynku, wykonano ciąg symulacji, w których usuwano odpowiednio okna na elewacji południowej i północnej. Pozwoliło to na analizę wskaźnika przewidywanej oceny średniej PMV jako miary komfortu cieplnego w zależności od umiejscowienia i ilości przegród przezroczystych.

Okna hali szklone są potrójną szybą o współczynniku przenikania ciepła  $U=0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Współczynnik całkowitej przepuszczalności promieniowania SHGC - Solar Heat Gain Coefficient ma wartość 0,49.

Przeprowadzono pięć symulacji:

- podstawowa – zgodna z założeniami projektu;
- usunięcie 50% przeszklenia elewacji południowej areny sportowej;
- usunięcie 100% przeszklenia elewacji południowej areny sportowej;
- usunięcie 50% przeszklenia elewacji północnej areny sportowej;
- usunięcie 100% przeszklenia elewacji północnej areny sportowej.

Okres symulacji obejmuje czas od 15 maja do 15 września, kiedy w Polsce występuje ryzyko przegrzewania. Aktywność fizyczną użytkowników oraz izolacyjność odzieży przyjęto na podstawie normy [2]. Wartość aktywności metabolicznej, informującej o wielkości strumienia ciepła produkowanego przez organizm ludzki, przyjęto 300 W/osobę. Wielkość ta odnosi się do ciała dorosłego mężczyzny o powierzchni  $1,8\text{m}^2$ , a dla kobiet i dzieci jest mnożona przez współczynniki korygujące: 0,85- kobieta i 0,75-dziecko. W próbach symulacyjnych założono wartość średnią współczynnika równą 0,9. Izolacyjność odzieży przyjęto na poziomie 0,3 clo dla analizowanego okresu letniego. Ilość osób przebywających na arenie sportowej, uwzględniona w pracy badawczej, wynosiła 100 osób.

Hala sportowa posiada system wentylacji mechanicznej, który umożliwia odzyskanie części energii cieplnej. Wysokosprawny wymiennik ciepła (rekuperator) przejmuje dużą część ciepła odzyskaną z powietrza wywiewanego. Energia ta zostaje przekazana do strumienia powietrza nawiewanego z zewnątrz. Wymiennik charakteryzuje się wysoką sprawnością powyżej 80 % i niskim zużyciem energii elektrycznej. Zimą powietrze zostaje w wymienniku podgrzane a latem – ochłodzone.

Wsparciem dla wentylacji mechanicznej, w badanym budynku, jest grawitacyjna wymiana powietrza. Zgodnie ze sposobem użytkowania obiektu, okna po stronie północnej są otwierane w momencie kiedy temperatura powietrza wewnątrz wynosi  $24^\circ\text{C}$ . Powierzchnie szklone po stronie południowej uchylane są rano, od godziny 7.00-9.00 i po południu od 15-18.00. Przyjęto także, że minimalna temperatura powietrza zewnętrznego, przy której dopuszcza się wentylację grawitacyjną to  $10^\circ\text{C}$ , a maksymalna wynosi  $26^\circ\text{C}$ .

W symulacjach założono minimalną ilość świeżego powietrza równą 10 l/s-osobę. Według klasyfikacji normy PN-EN 13779 [3], odpowiada to średniej (medium) jakości powietrza i oznaczane jest jako IDA2 (Indoor Air Quality - jakość powietrza wewnętrznego).

Zacienienia wewnętrzne zamodelowano w postaci ruchomych rolet, wykorzystywanych do ochrony przeciwsłonecznej kiedy temperatura powietrza zewnętrznego osiągnie wartość 24°C w godzinach 9.00-15.00. Zewnętrzne łamaczki światła o wysięgu 1 m są elementem stałym. Ich współczynnik zacienienia  $F_{sh,gl}$  wynosi w przybliżeniu 0,75.

### 3. Analiza symulacyjna obiektu

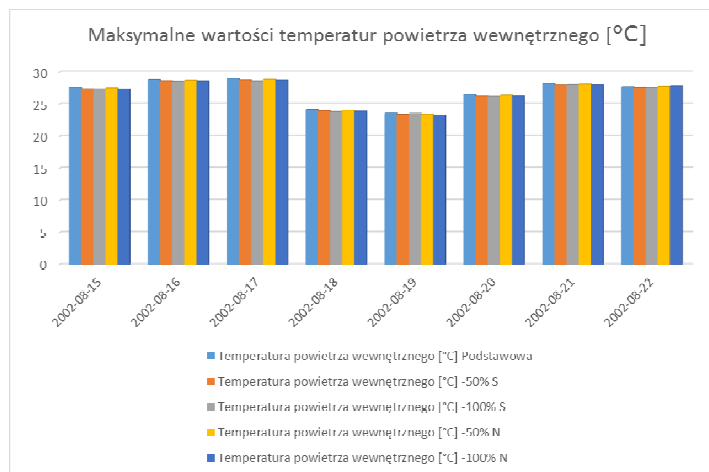
Maksymalne oraz średnie wartości podstawowych parametrów środowiskowych dla całego okresu analizy zawiera tabela 1. Obliczono także odchylenie standardowe, obrazujące rozrzut wyników w stosunku do wartości średniej. Dla czteromiesięcznego okresu analizy, wskaźnik komfortu cieplnego przewidywanej oceny średniej wypada korzystnie ponieważ średnia jego wartość wynosi 0,43 i mieści się w przedziale Fanger'a [4]. Najwyższa temperatura powietrza wewnętrznego wyniosła 29°C, a chwilowy wskaźnik komfortu cieplnego PMV przekroczył, dopuszczalną dla klimatu umiarkowanego, granicę równą 2,0. Miało to miejsce dnia 07.06. ok godziny 16.00, kiedy okna po stronie południowej były uchylone, a rolety zwinięte. Wpływ osłon przeciwsłonecznych jest podstawą oddzielnej analizy, ale warto wspomnieć o tym fakcie także i w tym przypadku.

Tabela 1. Miary statystyczne podstawowych parametrów środowiskowych dla całego okresu analizy wariantu podstawowego

Table 1. Statistical measures of primary environmental parameters for measurements carried out for the whole period of the analysis of the basic variant

	Wilgotność [%]	Fanger PMV [-]	Temperatura powietrza wewnętrznego [°C]	Temperatura promieniowania [°C]	Temperatura operatywna [°C]	Temperatura powietrza zewnętrznego [°C]
<b>Max</b>	86,95	2,04	29,41	26,41	27,76	32,83
<b>Średnia arytmetyczna</b>	64,04	0,43	19,61	20,45	20,03	17,02
<b>Odchylenie standardowe</b>	9,68	0,52	2,85	2,22	2,48	4,78

Przez wzgląd na dużą rozpiętość danych pomiarowych, odrzucono wartości skrajne, a do szczegółowej analizy przyjęto okres 8 dni, od 15.08 do 22.08. Patrząc pod kątem ryzyka przegrzewania, warunki środowiskowe wewnątrz były nieodpowiednie oraz stałe przez dłuższy czas. Maksymalne temperatury powietrza wewnętrznego przekraczały wartość 29°C, co przedstawiono na rysunku 2.

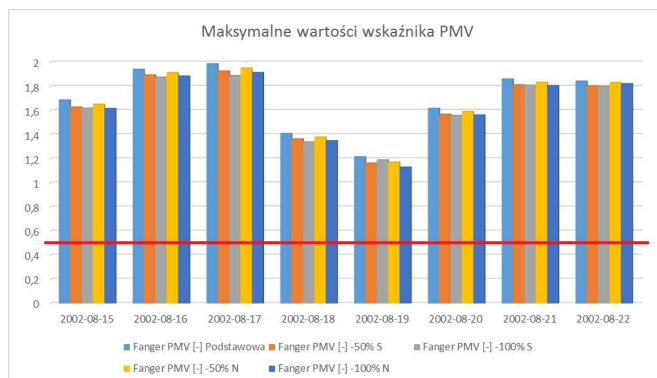


Rys. 2. Rozkład temperatury w hali dla wybranego okresu analizy

Fig. 2. Temperature distribution in hall for chosen analyze period

Rozkład temperatury powietrza wewnątrz hali, (rysunku 2), obrazuje bardzo niewielkie różnice w wartościach maksymalnych dla poszczególnych wariantów symulacji. Na podstawie otrzymanych wyników można jednak zauważyć, że rozwiązanie zastosowane w projekcie skutkuje najwyższymi temperaturami, najmniejsze wartości otrzymuje się po zredukowaniu powierzchni przeszkleń po stronie południowej.

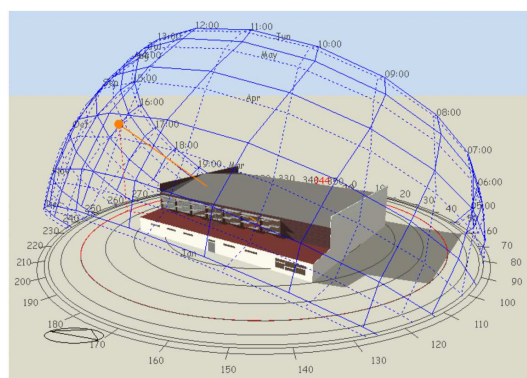
W rozpatrywanym dokładniej okresie ośmiodniowym, dobowa, maksymalna wartość wskaźnika przewidywanej oceny średniej zawierała się w przedziale 1,11 – 1,99. Wartości graniczne nie mieszczą się w strefie komfortu cieplnego Fanger'a [4], którą ograniczają wyznaczniki  $-0,5 - +0,5$ . Dla każdego przyjętego wariantu symulacji, w badanym obiekcie sportowym występuje dyskomfort, który w różny sposób może wpływać na samopoczucie użytkowników. Wpływ wielkości i rozmieszczenia okien na mikroklimat wewnątrz hali, w zależności od usytuowania ściany względem strony świata, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Rozkład wskaźnika PMV dla wybranego okresu analizy

Fig. 3. PMV factor values for chosen analyze period

Wariant wyjściowy, zgodny z założeniami dokumentacji projektowej, zawiera najwyższe wartości wskaźnika PMV. Największa wartość wskaźnika przewidywanej oceny średniej, wynosząca 1,99, wypada dnia 17.08. o godzinie 16.00. Symulację, obrazującą pozycję słońca nad badaną halą dla tego przypadku, zobrazowano na rysunku 4. Elewacja południowa poddana jest intensywnemu działaniu promieni słonecznych przez większą część dnia. W konsekwencji tego następuje kumulacja energii cieplnej wewnątrz, co skutkuje wzrostem zapotrzebowania na chłodzenie.



Rys. 4. Rozkład zacielenia w dniu 17.08 o godzinie 16.00

Fig. 4. Distribution of shading on 17.08 at 16.00

Podobnie, jak to miało miejsce w przypadku analizy temperatury powietrza wewnętrznego, różnice w poszczególnych wartościach wskaźnika komfortu są niewielkie. Wariant, w którym zredukowano powierzchnie przezroczyste na elewacji południowej o 100% wykazał najmniejszą wartość wskaźnika przewidywanej oceny średniej i wyniosła ona 1,89. Szklenie na elewacji północnej ma

mniejszy wpływ, w porównaniu z południową, na obniżenie zysków od promieniowania słonecznego. Zadaniem okien po stronie północnej jest przede wszystkim zapewnienie naturalnego oświetlenia oraz wykorzystanie ich do nocnego przewietrzania, a nie ochrona przed przegrzewaniem (tab. 2).

Tabela 2. Miary statystyczne wartości wskaźnika przewidywanej oceny średniej PMV

Table 2. Statistic measures of PMV values

	Podstawowa	-50% S	-100% S	-50% N	-100% N
<b>Max</b>	<b>1,99</b>	<b>1,93</b>	<b>1,89</b>	<b>1,95</b>	<b>1,91</b>
<b>Wartość średnia</b>	1,25	1,20	1,19	1,22	1,19
<b>Odchylenie standardowe</b>	0,36	0,35	0,35	0,36	0,37

Rozpatrując otrzymane wyniki, mimo małych różnic, potwierdza się ogólne przeświadczenie, że to właśnie południowe elewacje szklone przede wszystkim wpływają na komfort termiczny. Świadome projektowanie powinno uwzględniać optymalną ilość przeszklenia na każdej elewacji, ze szczególnym zwróceniem uwagi na przegrody po stronie południowej. W celu obniżenia wartości wskaźnika przewidywanej oceny średniej dla analizowanego przypadku hali, można byłoby zastosować bardziej skuteczne osłony zewnętrzne, blokujące migrację promieniowania. W hali zamontowane są zewnętrzne łamacze światła, ale o stałych lamelach. Można byłoby zastosować ruchome osłony, umożliwiające regulację kąta ustawienia lamel, w zależności od położenia słońca.

#### 4. Podsumowanie wyników

Przeprowadzone analizy dają jedynie wstępny pogląd wpływu doboru stopnia przeszklenia danej elewacji na mikroklimat wnętrza. W obowiązujących warunkach technicznych nie ma wymagań dotyczących ilości powierzchni szklonych w zależności od orientacji. Duże ilości promieniowania słonecznego przenikającego przez spore powierzchnie przezroczyste po stronie południowej, doprowadzają do wytworzenia niekorzystnych dla człowieka, warunków środowiska. Zastosowany w budynku system ochrony przed nadmiernymi zyskami słonecznymi, w postaci łamaczy zewnętrznych oraz rolet nie jest w stanie ochronić użytkowników hali przed dyskomfortem. Wzmoczone przegrzewanie i związane z tym zwiększenie temperatury wnętrza, wysokie wskaźniki PMV, mogą być przyczyną obniżenia zdolności koncentracji i aktywności życiowych użytkowników obiektu. Jeżeli nie ma ścisłej korelacji pomiędzy szeregiem rozwiązań ograniczających przegrzewanie pomieszczeń, nie jest możliwe utrzymanie komfortu cieplnego w okresie letnim.

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690.
- [2] PN-EN ISO 7730:2006, Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczenie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego.
- [3] PN-EN 13779:2008, Wentylacja budynków niemieszkalnych - Wymagania dotyczące właściwości instalacji wentylacji i klimatyzacji.
- [4] Fanger P.O., Komfort cieplny, Arkady, Warszawa, 1974.

## ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE DEPLOYMENT OF PARTITIONS TRANSPARENT ON MICROCLIMATE IN PUBLIC PASSIVE BUILDING

### Summary

The publication contains informations concerned to the impact of the transparent dividers deployment on the microclimate of the passive building. Five simulations were conducted allowing to qualify how much location of the windows is able to alter environmental conditions in the interior of the analysed room and it's influence on the limitation of overheating in summer. Windows on the south and northern elevation were removed about 50% and 100%. In the simulations another possibilities connected with minimization of an excessive solar profits were not taken into account such as the kind of applied sun protections, night airing, the influence of the thermal mass or also the control of moisture and the movement of the air. Because of the narrow range of analysis, divergences in results are not essential but however they allow to make preliminary conclusions. South glazed elevations first of all cause influence on the temperature values of the internal air and either on the index of the foreseen average rate. The variant in which transparent surfaces were reduced on the south elevation about 100% showed the the smallest value of the foreseen average rate. The large quantities of the sunny radiation, penetrating through large transparent surfaces from the south side, are the discomfort reason. Northern windows in confrontation with the south elevation contribute to a lesser extent the lowering of solar profits. Projecting of glazing can't be overdone in both sides. Large surfaces can be the reason of the warmth losses in the winter but either the cause of overheating in the summer. Assuring the proper microclimate in the given environment guarantees the efficiency of executed tasks as well as health of the users and that is why it should be the key matter in projecting.

**Keywords:** thermal comfort, PMV, overheating, glazing

*Przesłano do redakcji: 21.05.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Kamil RÓŻYCKI<sup>1</sup>

## EFEKTY ENERGETYCZNE WYBRANYCH WARIANTÓW TERMOMODERNIZACJI BUDYNKÓW MIESZKALNYCH

W artykule przeanalizowano możliwości zmniejszenia zużycia energii w grupie budynków mieszkalnych na przykładzie rzeczywistego kompleksu budynków należących do spółdzielni mieszkaniowej z lat 80-tych, zasilanej z lokalnej kotłowni węglowej. Istnieją różne rozwiązania, dzięki którym można osiągnąć założony cel. W niniejszym opracowaniu rozważono 4 warianty, z których pierwszy obejmuje pełną termomodernizację budynków (ściany zewnętrzne, stropodachy, stolarka okienna w częściach wspólnych). W wariantcie 2, oprócz rozwiązań zaproponowanych w wariantcie 1, rozważono wymianę instalacji wewnętrznej c.o. i c.w.u. Wariant 3 zawiera dodatkowo propozycję budowy nowej kotłowni gazowej. Ostatni wariant jest rozszerzeniem wariantu 3. Znajduje się w nim analiza wykorzystania kolektorów słonecznych na przygotowanie ciepłej wody użytkowej. W celu przygotowania bilansu energetycznego efektów termomodernizacji z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, zamodelowano budynki w programie Audytor OZC 6.5. Pro. Dodatkowo skorzystano z programu RETScreen 4, który pozwolił dobrać odpowiednią wielkość instalacji kolektorów słonecznych. Otrzymane wyniki zostały następnie zestawione i przeanalizowane. Głównym wnioskiem jaki otrzymano, jest bardzo korzystny wpływ termomodernizacji budynków na zmniejszenie ich zapotrzebowania na energię. W obiektach kilkudziesięcioletnich, wystarczy wykonać odpowiednią warstwę izolacji na przegrodach zewnętrznych aby zmniejszyć to zapotrzebowanie o 40-50%. W celu uzyskania większych efektów energetycznych, należy wykonać dodatkowe zadania modernizacyjne. Należy jednak pamiętać, że głęboka termomodernizacja, wykonana na grupie budynków, a nie na jednym obiekcie, jest najbardziej korzystnym ze wszystkich rozwiązań.

**Słowa kluczowe:** efektywność energetyczna, odnawialne źródła energii, audyt energetyczny, ocieplenie budynku, budownictwo wielorodzinne

### 1. Wprowadzenie

Zapotrzebowanie na energię wciąż wzrasta, w przeciwieństwie do zasobów paliw kopalnych, które kurczą się z każdym rokiem. Efektem tego jest rosnące zanieczyszczenie środowiska, a także koszty wytwarzania i przesyłu energii.

---

<sup>1</sup> Kamil Różycki, Politechnika Warszawska, Zakład Chłodziarstwa i Energetyki Budynku, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa; tel. 500752994; krozycki@nape.pl

Rozwiązaniem tych problemów może być zwiększenie efektywności wykorzystania energii oraz zmniejszenie jej zużycia. Jak wynika z danych GUS-u [1], w Polsce w 2013 roku, największe zużycie energii występowało w sektorze gospodarstw domowych stanowiąc 33% całości. W przedstawionym sektorze w 2012 roku, aż 68,8% energii było potrzebne na cele ogrzewania pomieszczeń. Kolejną pozycję, z wynikiem 14,8%, stanowiło zużycie energii niezbędnej do przygotowania ciepłej wody użytkowej [1].

Wyznaczając zapotrzebowanie na energię dla budynku należy wykonać bilans energetyczny obiektu, w którym zestawione zostaną zarówno zyski, jak i straty. Te pierwsze pochodzą przede wszystkim z energii promieniowania słonecznego, która przedostaje się do budynku przez przegrody przezroczyste. Nie bez znaczenia są również zyski od ludzi i urządzeń znajdujących się wewnątrz pomieszczeń. W budynkach tradycyjnych energia jest tracona na drodze przenikania przez przegrody przezroczyste (okna 15-25%), nieprzezroczyste (ściany 20-30%, dach 10-15%), piwnicę 3-6% oraz przez wentylację (30-40%) [2]. Podstawowymi czynnikami mającymi wpływ na rozkład zużycia energii przez budynek są przede wszystkim: lokalizacja i otoczenie budynku, warunki klimatyczne, dostępność energii promieniowania słonecznego, kształt budynku, rozmieszczenie pomieszczeń, a także sposób użytkowania przez mieszkańców.

Według danych Eurostatu [3] w Polsce w 2014 roku 44,7% ludności mieszkało w budynkach wielorodzinnych (przykładowa grupa takich budynków została poddana dokładniejszej analizie w dalszej części artykułu). W przypadku takich budynków straty ciepła wynoszą: 28% przez okna, 25% przez ściany, 39% przez wentylację, 4% przez stropodach oraz grunt [4]. Przedstawione wartości są wartościami uśrednionymi. Istnieją różne analityczne rozwiązania pozwalające zamodelować budynek, a następnie dobrać takie rozwiązania, które w optymalny sposób pozwolą na zmniejszenie jego zapotrzebowania na energię. Jednym z rozwiązań, które może wpłynąć korzystnie na ekonomiczną stronę przedsięwzięcia jest wykonanie analizy, a następnie modernizacji nie dla jednego budynku lecz dla całej ich grupy, najlepiej znajdujących się w bliskiej odległości od siebie. W niniejszym artykule przedstawiono propozycję termomodernizacji grupy budynków, która należy do spółdzielni mieszkaniowej i która znajduje się na terenie województwa mazowieckiego.

## **2. Opis stanu istniejącego badanej grupy budynków**

Analizowane budynki (Rys.1-4) są budynkami rzeczywistymi. W skład grupy budynków wchodzi 4 obiekty 3-kondygnacyjne, całkowicie podpiwniczone wybudowane w latach 1982-1985, 1 obiekt 2-kondygnacyjny, częściowo podpiwniczony z roku 1967 oraz obiekt parterowy, niepodpiwniczony z roku 1965. Wszystkie obiekty poza ostatnim są wykonane w technologii betonowych elementów prefabrykowanych. W budynkach ściany szczytowe mają grubość 27 cm (w dwóch z nich wykonano docieplenie 3 cm styropianu), a pozostałe

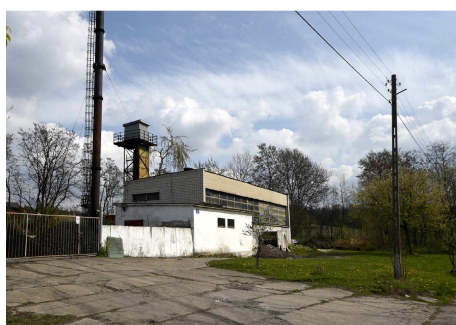




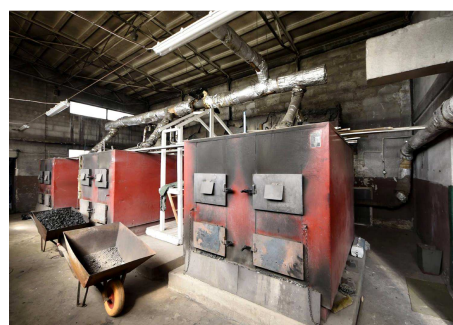
Rys. 1. Budynek 3-kondygnacyjny (fotografia własna)  
Fig. 1. 3-storey building (own photography)



Rys. 2. Budynek 2-kondygnacyjny (fotografia własna)  
Fig. 2. 2-storey building (own photography)



Rys. 3. Kotłownia (fotografia własna)  
Fig. 3. Boiler house (own photography)



Rys. 4. Kotłownia (fotografia własna)  
Fig. 4. Coal boilers (own photography)

ściany zewnętrzne 24 cm. W większości przypadków okna w częściach mieszkalnych zostały już wymienione, należy jednak wymienić okna w częściach wspólnych (klatki schodowe). Budynek parterowy jest wykonany z drewnianych bali.

Źródłem ciepła dla badanej grupy budynków jest instalacja centralnego ogrzewania (c.o.), dla której czynnikiem grzewczym jest woda pogrzana w osiedlowej niskotemperaturowej kotłowni węglowej wykonanej w latach 80-tych. Ciepła woda użytkowa (c.w.u.) dla 4 największych budynków jest podgrzewana w 4 pojemnościowych podgrzewaczach, każdy o pojemności 1600 litrów. W pozostałych budynkach przygotowanie c.w.u. odbywa się indywidualnie w elektrycznych lub gazowych podgrzewaczach.

### 3. Metodyka i wyniki badań

W celu zmniejszenia zapotrzebowania budynku na energię należy zastanowić się nad możliwymi wariantami modernizacji, a następnie rozpatrzyć, które z rozwiązań spełni określone oczekiwania.

Aby wykonać obliczenia energetyczne dla badanego przypadku, należało rozpocząć pracę od stworzenia modelu komputerowego każdego z budynków. Dla celów niniejszej pracy, obliczenia mocy cieplnej systemu grzewczego oraz zużycia energii cieplnej do ogrzewania zostały wyznaczone w programie Auditor OZC 6.5 pro. Obliczenia sezonowego zapotrzebowania budynków w standardowym sezonie grzewczym wykonano na podstawie normy PN-EN 13790 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia”. Moc obliczono na podstawie normy PN-EN 12831 „Instalacje grzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.”

Zaproponowano 4 warianty, z których każdy kolejny zawiera prace z poprzedniego poszerzone o dodatkowe działanie. Wariant 1 dotyczy termomodernizacji każdego z budynków, tj. ocieplenie ścian, stropodachu, wymiana stolarki okiennej w częściach wspólnych. Wybrano takie rozwiązania, które spełniają „Warunki Techniczne” [5] obowiązujące od 2017 r. Wariant 2 jest poszerzony o wymianę instalacji c.o. i c.w.u. Wariant 3 przewiduje budowę nowej kotłowni gazowej. Wariant 4 zawiera instalację kolektorów słonecznych, których zadaniem będzie pokrycie części potrzeb na przygotowanie c.w.u. (rys. 5.).



Rys. 5. Budynek 3-kondygnacyjny zamodelowany w programie Auditor OZC 6.5. Pro

Fig. 5. 3-storey building modeled in the Auditor OZC 6.5. Pro

#### 4. Analiza wyników

Najważniejsze z uzyskanych wyników zostały zestawione w tabeli 1. Wartości dotyczące zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową zostały wyznaczone za pomocą wzorów zawartych w odpowiednim Rozporządzeniu [6].

Tabela 1. Charakterystyka energetyczna grupy budynków

Table 1. The energy performance of the group of buildings

Charakterystyka energetyczna grupy budynków	stan istniejący	stan po termomodernizacji			
		W1	W2	W3	W4
Obliczeniowa moc cieplna systemu grzewczego [kW]	495,6	284,2	284,2	284,2	284,2
Obliczeniowa moc cieplna (max) na przygotowanie c.w.u. [kW]	287,2	287,2	246,2	181,9	181,9
Roczne obliczeniowe zużycie energii do ogrzewania budynku* [GJ/rok]	8853,3	4623,8	3821,1	2614,4	2614,4
Roczne obliczeniowe zużycie energii do przygotowania c.w.u.* [GJ/rok]	1197,1	1197,1	1026,1	757,9	558,9
Roczne obliczeniowe zużycie energii razem* [GJ/rok]	10050,4	5820,9	4847,2	3372,3	3173,3
Zaoszczędzona energia [%]	0	42,1	52,8	66,4	68,4

\*z uwzględnieniem sprawności – energia końcowa

#### 4.1. Wariant 1

Wyniki obliczeń, wskazują na to, że zaproponowana termomodernizacja budynków jest bardzo efektywna energetycznie. W stanie istniejącym, budynki są w zdecydowanej mierze niedocieplone. W wariantcie 1 dla przegród budynków zaproponowano takie rozwiązania, aby spełnić wymagania określone w „Warunkach Technicznych” [5]. Ściany zewnętrzne są docieplone 11 cm styropianu o współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda$  na poziomie 0,031 W/mK. Dzięki temu rozwiązaniu współczynnik przenikania ciepła U dla ścian zewnętrznych zmniejsza się z 1,3 do 0,23 W/m<sup>2</sup>K. Współczynnik U dla stropodachu wentylowanego, po dociepleniu 20 cm granulatu z wełny mineralnej o  $\lambda=0,042$  W/mK, wynosi 0,18 W/m<sup>2</sup>K (1,13 W/m<sup>2</sup>K – stan istniejący). W budynkach dodatkowo zaproponowano wymianę okien w częściach wspólnych, czyli na klatkach schodowych na takie o współczynniku U=1,1 W/m<sup>2</sup>K (obecnie 3,5 W/m<sup>2</sup>K).

Termomodernizacja wszystkich budynków, doprowadzając je do wymagań technicznych WT 2017, zmniejsza zapotrzebowania na energię o 42,1%.

#### 4.2. Wariant 2

Wariant 2, oprócz rozwiązań zaproponowanych w wariantcie 1, rozważono wymianę instalacji wewnętrznej c.o. i c.w.u. Przedsięwzięcie to obejmuje swoim zakresem wymianę wszystkich elementów obu instalacji. Sprawność systemu grzewczego wzrasta z 43 do 51%. W przypadku systemu przygotowania c.w.u. wartość ta zmienia się z 39 na 46%. Realizacja wariantu 2 przynosi zmniejszenie zapotrzebowania na energię o 52,8% w stosunku do stanu istniejącego.

### 4.3. Wariant 3

Między innymi ze względu na wzrastające zanieczyszczenie środowiska, zaleca się, aby wymieniając źródło ciepła rozważyć bardziej ekologiczne rozwiązanie niż istniejące w obecnym stanie. Przy termomodernizacji budynków zasilanych z lokalnych kotłowni węglowych lub indywidualnych konwencjonalnych źródeł ciepła, często analizuje się możliwość przyłączenia do miejskiej sieci ciepłowniczej. Gdy taka możliwość nie istnieje, należy wybrać inne rozwiązanie. Podobnie jest w analizowanym przykładzie, dlatego zaproponowano budowę nowej kotłowni gazowej. Sprawność całkowita takiego systemu wzrasta z 51 na 75%, a oszczędność energii w stosunku do stanu istniejącego wynosi 66,4%.

### 4.4. Wariant 4

W ostatnim wariantcie zaproponowano, aby dodatkowo zastosować kolektory słoneczne, które wspomogą system przygotowania c.w.u. Obliczenia zostały wykonane w programie RETScreen 4. Po wprowadzeniu do programu przykładowego kolektora słonecznego nachylonego pod kątem 35°, a także sprawności wytwarzania ciepła w kolektorze (70%) oraz przesyłu ciepła (85%) oraz pozostałych strat, wybraniu najbliższej lokalizacji z dostępnej w programie bazy stacji meteorologicznych, uzyskano wyniki. System dobrano tak, aby kolektory pokryły około 30% rocznych potrzeb na energię na cele przygotowania c.w.u. we wszystkich budynkach łącznie. Łączna liczba kolektorów słonecznych wynosi 90, a całkowita powierzchnia czynna absorbera to 208,8 m<sup>2</sup>. Dzięki takiemu rozwiązaniu, połączonemu z poprzednimi wariantami, można łącznie zmniejszyć zużycie energii o 68,4%.

W opracowaniu podjęto również próbę określenia kosztów i efektów finansowych dla rozpatrywanych wariantów. Wyniki otrzymano analizując rynek i wybierając odpowiednie dostępne rozwiązania. Dokładne dane nie będą jednak opisane w niniejszym opracowaniu. Należy jednak zaznaczyć, że kompleksowa termomodernizacja wraz z wykonaniem jej w kilku budynkach jednocześnie obniża koszty jednostkowe w stosunku do modernizacji budynków osobno. Wyniki zestawiono w tabeli 2. Zauważa się, że pomimo tego, że w wariantcie pierwszym oszczędności energii są najwyższe, to czas zwrotu inwestycji jest najmniejszy.

Tabela 2. Określenie kosztów i efektów finansowych rozpatrywanych wariantów

Table 2. Determination of the cost and financial effects of the presented variants

Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	Planowane koszty [mln. zł]	Roczna oszczędność kosztów energii [tys. zł] **	Procentowa oszczędność energii [%]	Czas zwrotu [SPBT]
W1	1,2	101,5	42,1	11,7
W2	1,9	124,9	51,8	15,6
W3	2,2*	61,9	66,4	35,3
W4	2,8*	71,1	68,4	38,9

\*bez kosztów przyłącza

\*\* różnica między kosztami energii przed wykonaniem wariantu, a kosztami po jego wykonaniu

## 5. Wnioski

Planując przeprowadzenie termomodernizacji budynku warto wcześniej zastanowić się nad wykonaniem dodatkowych prac związanych ze zwiększeniem efektywności energetycznej obiektu. Szczególnie korzystnym rozwiązaniem wydaje się wykonanie działań nie na jednym, lecz jednocześnie na grupie budynków. Warto jednak zauważyć, że w pierwszej kolejności należy wykonać pełną termomodernizację przegród budynku. Wykonując takie działania na budynkach z lat 80-tych czy starszych, doprowadzając je do obowiązujących standardów, można zmniejszyć zapotrzebowanie na energię o 40-50%, a nawet więcej. Dodatkowe czynności, np. zwiększające sprawność systemów grzewczego i przygotowania c.w.u., a także wymiana źródła ciepła dają również zauważalne korzyści. Kompleksowe działania na budynkach kilkudziesięcioletnich, w których i tak należałoby wykonać prace remontowe, pozwalają na zmniejszenie zużycia energii nawet 3-4 krotnie. Wykonując termomodernizację budynku warto również rozważyć zastosowanie odnawialnych źródeł energii. Pomimo tego, że nie zawsze efekty energetyczne są duże, to pojawia się wiele innych korzyści i można się spodziewać, że korzystanie z takich systemów w budownictwie stanie się wkrótce standardem.

*Opisane prace są wykonywane w ramach realizacji projektu DREEAM, finansowanego z programu Horyzont 2020 (<http://dreeam.eu/>), którego polskim partnerem jest Narodowa Agencja Poszanowania Energii S.A.*

## Literatura

- [1] Główny Urząd Statystyczny, Efektywność wykorzystania energii w latach 2003-2013, Warszawa 2015: <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/efektywnosc-wykorzystania-energii-w-latach-2003-2013,5,10.html> {dostęp 17.05.2016 r.}.
- [2] Węglarz A.: „Budynki tradycyjne,” materiał ze studiów podyplomowych na Politechnice Warszawskiej, Budownictwo Energooszczędne: Certyfikacja energetyczna, audyt energetyczny i termomodernizacja budynków, 2015.
- [3] Eurostat: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> {dostęp 17.05.2016 r.}.
- [4] Sarosiek W., Sadowska B., Świącicki A.: Wpływ eksploatacji mieszkań na zużycie energii, Politechnika Białostocka, Katedra Podstaw Budownictwa i Fizyki Budowli, 2002.
- [5] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2013 r. poz. 1409, z późn.zm.2).
- [6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2015 poz. 376).

## ENERGETIC EFFECTS OF SELECTED VARIANTS OF THERMO-MODERNIZATION IN RESIDENTIAL BUILDINGS

### Summary

This article examines the possibility of reducing energy consumption in a group of residential buildings on the example of existing complex of buildings from the 80s which is supplied from the local coal boiler house. They belong to housing cooperative. There are various solutions for reducing energy demand. This study examines four variants. The 1st, includes a full thermo-modernization of buildings (external walls, roofs, windows in the common areas). The 2nd variant, in addition to the solutions proposed in variant 1, includes exchange of internal installations of central heating and domestic hot water systems (DHW). The 3rd variant includes 2nd variant and exchange of the old coal boiler for the new gas boiler. The last variant includes 3rd variant and installation of solar collectors for preparation of DHW. In order to analyze the energy consumption and effects of energy balance of the thermo-modernization with using renewable sources of energy, the buildings have been modeled in the Audytor OZC 6.5 Pro software. The installation of solar collectors has been selected by using RETScreen 4 software. The results were summarized and analyzed. The main conclusion which was observed is very positive impact of thermal insulation on the building energy demand. The same insulation, when it is made on buildings from the 80s and older, can reduce energy demand by 40-50%. In order to achieve greater energy effects, his necessary to perform additional tasks of modernization. The best solution is deep thermo-modernization made on a group of buildings.

**Keywords:** energy efficiency, renewable sources of energy, energy audit, building insulation, multi-family housing

*Przesłano do redakcji: 26.05.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Alena TAZIKOVA<sup>1</sup>

## ENVIRONMENTAL LIFE-CYCLE COSTS OF BUILDING MATERIALS

The purpose of the article is to point to the necessary calculation of environmental costs in the construction budget. It is necessary for building materials to be in environmental databases. The databases contain the measured values of the different environmental loads, generated by the construction materials and products, during the life cycle phases of the building material. These databases are part of the calculator software. The article explains the principle and necessity to calculate the environmental costs for manufacturers of building materials and products in Slovakia, which will be required from 2020.

**Keywords:** environmental cost, life cycle assessment, databases, building materials, building products

### 1. Introduction

Currently, the environmental costs are calculated as costs for waste disposal, fines for environmental pollution and so on. But real environmental costs are rooted in every building product and materials. Environmental costs represent the amount of environmental burdens, which are created by the manufacture of building products and materials. These calculation problems will begin to resolve after 2020, according to the European Directive EPBD 2 – Energy Performance of Building Directive. The EPBD is an instrument for enhancing the building regulations on energy performance of the building stock in the EU member states. The directive sets binding targets that have to be transposed into national law and implemented via national regulations [1, 2, 10]. The environmental impact assessment is based on the life cycle assessment of building products. The article maps possible approaches to calculating environmental costs in the world. The purpose of this paper is to offer an explanation of the environmental costs calculation for Slovak producers of building materials.

---

<sup>1</sup> Alena Tazikova, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Construction Technology and Management, e-mail: alena.tazikova@tuke

## 2. Environmental databases

For the purpose of calculating environmental costs, it is necessary, that building materials must be written into databases. The databases contain the measured values of the different environmental loads, which are generated, when construction materials and products are produced. Those values are measured during the life cycle phases of the building materials and products. Calculation software draws these values from these databases.

There are several databases in the world that can be used to calculate environmental costs such as:

The Ecoinvent database [3] provides well documented process data for thousands of products, helping you make truly informed choices about their environmental impact. The database was developed by the Swiss Center for Life Cycle Inventories. The "Cradle-to-gate" model is applied in most LCA studies. The database is accessible free of charge and is also included in the SimaPro and GaBi software.

The GaBi Databases [4] are the largest internally consistent LCA databases on the market today and contain over 10,000 ready-to-use Life Cycle Inventory profiles. Over 20 years of life cycle expertise by thinkstep is captured in GaBi Databases, which always feature the most accurate Life Cycle Inventory profiles based on primary industry data.

The Athena's databases [5] are regionally sensitive, taking into consideration manufacturing technology, transportation and electricity grid differences as well as recycled content differences for products produced in various regions. Athena databases are built from the ground up using actual mill or engineered process models and are not reliant on trade or government data sources.

The U.S. Life Cycle Inventory (LCI) database [6] is created to help life cycle assessment (LCA) practitioners answer questions about environmental impact. This database provides individual gate-to-gate, cradle-to-gate and cradle-to-grave accounting of the energy and material flows into and out of the environment that are associated with producing a material, component, or assembly in the U.S.

These databases contain the values of monitored environmental loads during the individual phases of the life cycle of the construction product (material). On the basis of these values, we can find out product, which has less of a burden on the environment. Based on the emission values, we are able to classify building products from the most environmentally conscious. Based on this consideration, then it is possible to make an appropriate selection of products in the budget of the building object, for the investor. There is plenty of software, which uses these databases to draw data from them.



## 2.1. Building for environmental and economic sustainability

An example of the use of environmental values is the BEES software. BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) software brings a technique for selecting cost-effective, environmentally-preferable building products. Developed by the NIST (National Institute of Standards and Technology) Engineering Laboratory the tool is based on consensus standards and designed to be practical, flexible, and transparent. BEES measures the environmental performance of building products by using the life-cycle assessment approach specified in the ISO 14040 series of standards [7]. All stages in the life of a product are analyzed: raw material acquisition, manufacture, transportation, installation, use, and recycling and waste management. Figure 1 shows the structure of the observed environmental values (Fig. 1).

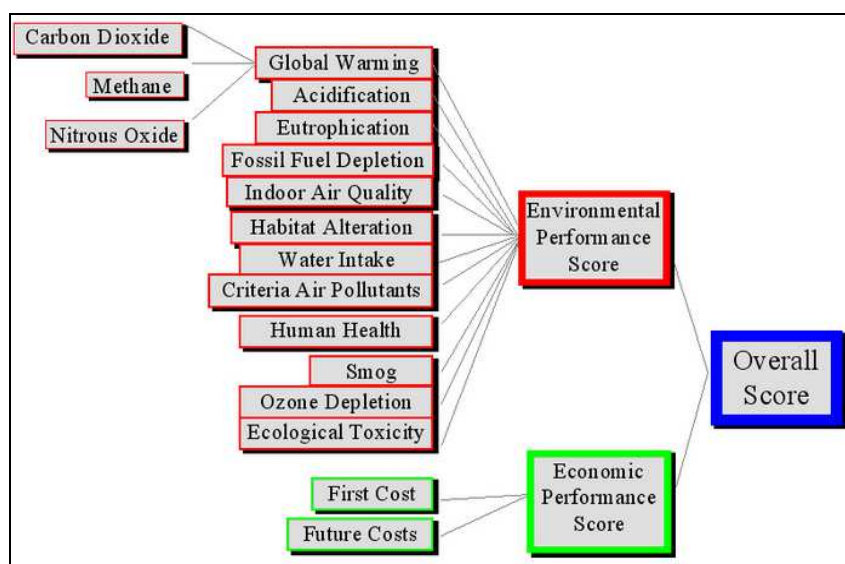


Fig. 1. The structure of the monitored environmental values (BEES), based on [7]

Rys. 1. Struktura monitorowanych wartości środowiskowych (BEES), na podstawie [7]

As an example: We also mention the environmental assessment of the building material of the top layers of flooring (Fig. 2). It would be necessary to evaluate all construction materials in this way, for calculation environmental cost.

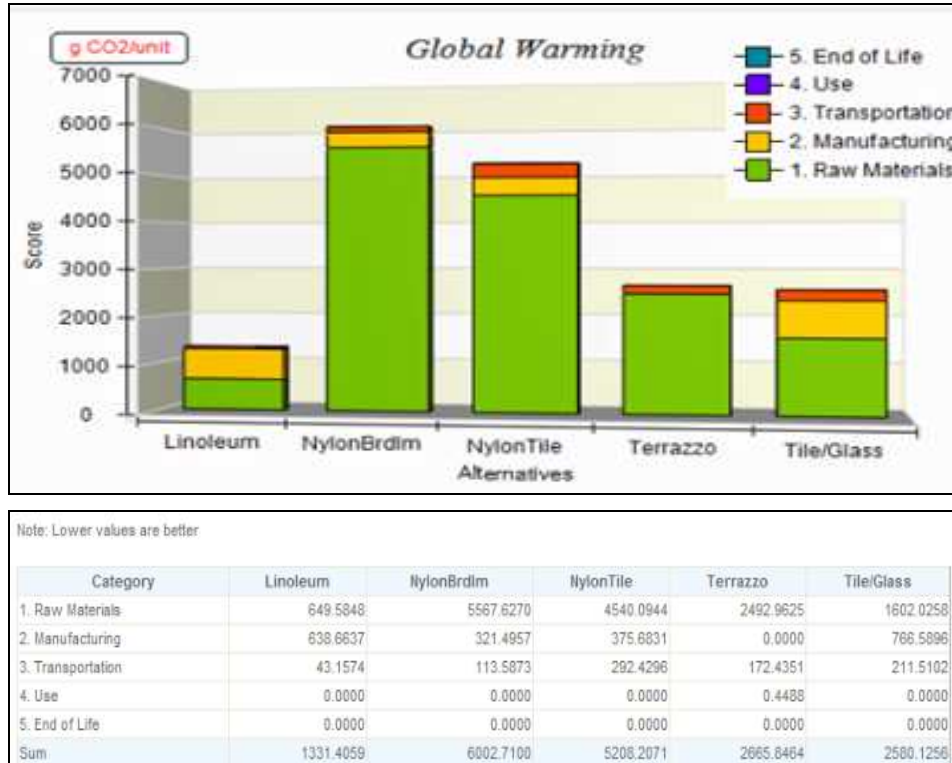


Fig. 2. Measured CO<sub>2</sub> values throughout the life cycle (top layers of floors), based on [7]

Rys. 2. Zmierzone wartości CO<sub>2</sub> w całym cyklu życia (górne warstwy podłóg), na podstawie [7]

## 2.2. Environmental declaration of building products EPD

One of the environmental databases is also the EPD - Environmental Product Declaration. Thanks to the international standardization organization and ISO 21930:2007 - Environmental declaration of building products, there are more and more manufacturers of construction products, which are preparing environmental statements about their products. The EPD has to provide information for planning, design and construction of the assessment, that information is verifiable, accurate and comprehensive estimate any impact on the environment. EPD is based on the LCA standards, but it may also include information about a product or material only in a certain phase of LCA (Fig. 3) [8]. In this article, the issue of environmental costs was analyzed on a specific example under the following marginal conditions:

The cement used in the concrete constructions was chosen as the building material. Only the production phase was selected from the LCA due to the missing data in the other LCA phases. From Global warming was selected for the monitored environmental parameter only CO<sub>2</sub> eq.

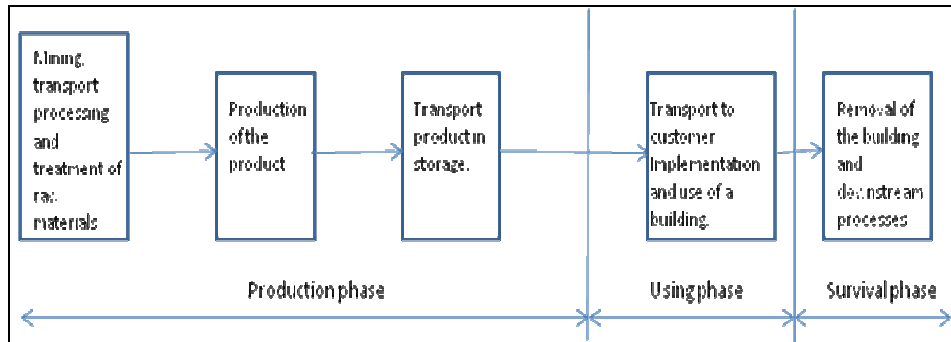


Fig. 3. The phases of LCA in EPD

Rys. 3. Etapy LCA w EPD

On the basis of the comparison, a cement is selected which has less of a burden on the environment in its production phase. With this methodology, it is possible to compare products and materials to each other. However, it is necessary to measure all the values of environmental damage in all phases of LCA products and materials. The investor can then choose an environmentally more suitable product. It is also cheaper because it is less damaging to the environment and smaller sanctions for its use are calculated [8, 9].

The investor has to bear the costs of his project in advance, throughout the LCA of the project. This is a measure to protect the environment for future generations. This transfers responsibility from the environmental burden on the investor.

Next, the values of CO<sub>2</sub> in the production of cement are given from the EPD database [9].

The Romanian cement manufacturer Holcim has registered 3 EPD certificates. The certificate from which the data were used was registered 16.05.2014 and is valid until 16.05.2018. Upon expiration of the license, the manufacturer is required to repeat and declare the new EPD, or to demonstrate that the measured values have not changed and the certificate extended by 4 or 5 years. Manufacturer Holcim declares the following average values for its cements.

Another producer is Israeli manufacturer Neshor Israel Cement Enterprises Ltd. This manufacturer has also registered 3 certificates, all for cement. The certificate from which the information is drawn up is registered as of 16.01.2014 and is valid until 14.01.2019.

The third producer is the Brazilian manufacturer Votorantim Cimentos. Votorantim has also registered 3 EPD certificates for cement, plaster and concrete. The certificate I used for the calculations is registered as of 06.07.2016 and is valid until 20.06.2021.

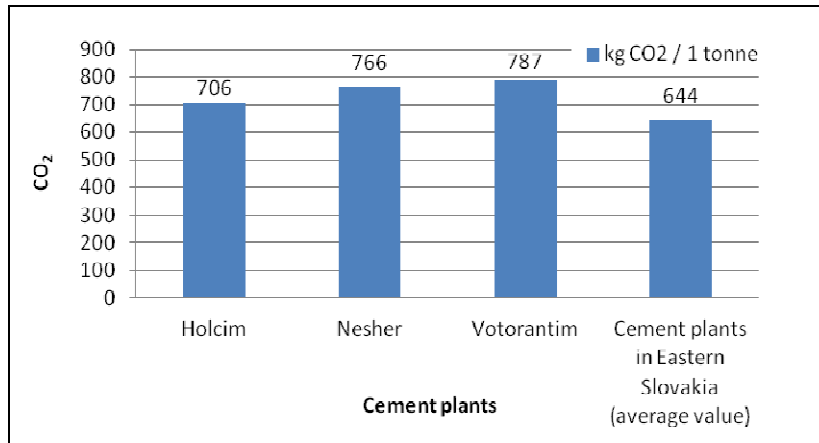


Fig. 4. The release of CO<sub>2</sub> eq. in the production of cement. Source: Author and based on [9]

Rys. 4. Uwolnienie równoważnika CO<sub>2</sub> w produkcji cementu. Źródło: Autor oraz na podstawie [9]

For example, in calculating the construction budget, it would be possible to choose the cement that is less burdensome for the concrete. The release of CO<sub>2</sub> eq. from production of cement is shown in the graph (Fig. 4).

### 3. Joint calculation construction costs and environmental costs

In Slovakia, the most commonly used calculation tool for creating budgets is currently CENKROS. CENKROS is quality software of measurement and management of building production. This system covers all activities associated with the preparation and execution of the contract. The program allows you to quickly prepare a quality quote, simply calculate the cost-effective use of execution and billing of the work performed and price estimates compiled by financial indicators. The system is designed for budget designer, cost accountants, preparer, purchasers, designers and suppliers of construction work [11].

Technological and organizational variant for baseband concreting has added columns for CO<sub>2</sub> values for used Holcim cement. An identical table would include data for cement from Neshor and Votorantim. Consequently, the budgeter could choose an environmentally more advantageous product. Although there is no quantifiable financial cost to date, we can build a range of building materials and products that we more or less burden the environment. High environmental value will mean a high cost. The technical organizational version of the calculation of concrete foundation strips in Cenkros software. Cement manufacturers must apply for inclusion in the database. Then we will be able to calculate the environmental costs in Slovakia from 2020.

## 4. Conclusion

In order to calculate construction costs together with environmental costs is dependent on the existence of environmental data (EPD database). It is equally important to develop an tools and formats in which environmental information will be connecting to the calculated construction costs, and that this environmental information to assign their economic impacts. Similarly as in European countries and in Slovakia after 2020 will be need the calculations of the environmental costs still topical in the design phase of the project in order to choose the best possible solution with respect the principles of sustainable development. The investor will be responsible for the construction during its entire life cycle. Therefore, the investor chooses products that are more environment-friendly, which means they have less environmental costs.

### *Acknowledgements*

*The article presents a partial research result of project VEGA - 1/0677/14 "Research of construction efficiency improvement through MMC technologies"*

## Bibliography

- [1] Fesanghary M., et al.: Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm. *Building and Environment*. Vol. 49, Iss. 1, 2012, p. 245-250.
- [2] <http://www.epbd-ca.eu/outcomes/2011-2015/CA3-BOOK-2016-A-web.pdf> [access: 8 June 2011].
- [3] <http://www.ecoinvent.org/database/database.html> [access: 8 June 2017].
- [4] [www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com) [access: 8 June 2017].
- [5] <http://www.athenasmi.org/our-software-data/ecocalculator/>[access: 8 June 2017].
- [6] <http://www.nrel.gov/lci/>[access: 8 June 2017].
- [7] <https://www.nist.gov/services-resources/software/bees>[access: 8 June 2017].
- [8] <http://www.environdec.com/> [access: 8 June 2017].
- [9] Palatáš A.: Calculation of environmental costs. Diploma Thesis, TUK, Košice 2017.
- [10] Urbanik M.: Approach to Clustering Costs and Losses Incurred as a Result of Gas Network Failure. *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury – Journal Of Civil Engineering, Environment And Architecture*, t. XXXIV, z. 64 (1/17), styczeń-marzec 2017, str. 487-494, DOI:10.7862/rb.2017.44.
- [11] <https://www.kros.sk/cenkros-ocenovanie-a-riadenie-stavebnej-vyrobny>[access: 8 June 2017].

## ŚRODOWISKOWY CYKL KOSZTÓW ŻYCIA MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

### Streszczenie

Celem artykułu jest wskazanie na niezbędne obliczanie kosztów ochrony środowiska w budownictwie. Konieczne jest, aby materiały budowlane znajdowały się w środowiskowych bazach danych. Bazy danych zawierają zmierzone wartości różnych obciążeń środowiskowych, generowanych przez materiały budowlane i produkty, podczas faz cyklu życia materiału budowlanego. W artykule wyjaśniono zasadę i konieczność obliczania kosztów środowiskowych dla materiałów budowlanych i produktów przez producentów na Słowacji, które będą wymagane od 2020 roku.

**Słowa kluczowe:** koszty środowiskowe, ocena cyklu życia, bazy danych, materiały budowlane, produkty budowlane

*Przesłano do redakcji: 24.10.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Krzysztof JABŁOŃSKI<sup>1</sup>  
Włodzimierz STEMPSKI<sup>2</sup>

## ROLA LASÓW I LEŚNICTWA W POCHŁANIANIU GAZÓW CIEPLARNIANYCH

Wśród działań zmierzających do złagodzenia zmian klimatycznych ważną rolę odgrywają lasy oraz aktywnie prowadzona gospodarka leśna. Lasy pełnią rolę nie tylko pochłaniacza dwutlenku węgla, ale stanowią ważne źródło surowca drzewnego i biomasy leśnej, dostarczając substytutów materiałów nieдрzewnych oraz paliw kopalnych. Obecnie, informacje o działaniach w zakresie zalesień, wylesień oraz gospodarki leśnej stanowią część corocznych raportów, przygotowywanych na mocy ramowej konwencji klimatycznej oraz protokołu z Kioto. Wśród sektorów objętych sprawozdawczością tylko kategoria „Użytkowanie gruntów, zmiany użytkowania gruntów i leśnictwo” (LULUCF) stanowi pochłaniacz emisji gazów cieplarnianych netto. W Polsce w sektorze LULUCF lasy cechują się największym pochłanianiem dwutlenku węgla w przeliczeniu na jednostkę powierzchni, osiągając wartość 4,42 t CO<sub>2</sub> na ha. Gospodarka leśna przyczynia się do pochłaniania dwutlenku węgla znacznie bardziej niż zalesianie netto. Średnio, w ostatnich latach wielkość pochłaniania dwutlenku węgla z tytułu prowadzenia gospodarki leśnej w Polsce wynosiła blisko 38 mln ton rocznie, zaś zalesiania netto rocznie pochłaniały średnio nieco ponad 2 mln ton dwutlenku węgla. Obliczenia wskazują, że wprowadzenie jednostek pochłaniania dwutlenku węgla z tytułu prowadzenia gospodarki leśnej i zalesień do handlu emisjami, przy obecnych cenach dwutlenku węgla, mogłoby być źródłem przychodu na poziomie ok. 70 mln Euro rocznie. Nie tylko sam fakt istnienia lasów jako ekosystemu, ale aktywne prowadzenie gospodarki leśnej przyczynia się do sekwestracji dwutlenku węgla, co stawia leśnictwo w roli ważnego czynnika przeciwdziałającego zmianom klimatycznym i wzywa do rychłego włączenia sektora LULUCF do celu redukcyjnego emisji.

**Słowa kluczowe:** gospodarka leśna, sekwestracja węgla, pochłaniacz CO<sub>2</sub>, substytucja

### 1. Wprowadzenie

Problematyka związana z ochroną klimatu od kilkudziesięciu lat stanowi przedmiot zainteresowania społeczności naukowej i polityków. Jest to obecnie

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Krzysztof Jabłoński, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Techniki Leśnej, ul. Wojska Polskiego 71C, 60-625 Poznań; tel. 618487640; jabkrys@up.poznan.pl

<sup>2</sup> Włodzimierz Stempski, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Techniki Leśnej, ul. Wojska Polskiego 71C, 60-625 Poznań; tel. 618487644; stempski@up.poznan.pl

jedno z największych wyzwań, w obliczu którego stoi współczesny świat. Wy różnia się kilka długoterminowych trendów [1], dotyczących, mniej lub bardziej bezpośrednio, działań podejmowanych w zakresie gospodarowania przyrodą. Są to: wzrastająca liczba ludności na świecie, zmiany klimatyczne, oraz rosnący niepokój o zaopatrzenie w nośniki energii.

Kolejne raporty Międzyrządowego Panelu ds. Zmian Klimatu (IPCC) potwierdzają istotny wpływ czynników antropogenicznych na zmieniający się klimat. Konwencja klimatyczna, a następnie, obowiązujący od 2005 r., Protokół z Kioto stanowiły wyraz działań politycznych, zmierzających do ograniczenia negatywnego wpływu człowieka na ziemski klimat. Problematyka ochrony środowiska naturalnego znalazła swój wyraz także w dokumentach opracowanych przez autorytety moralne, jak chociażby Encyklika *Laudato Si*, Papieża Franciszka [2].

Lasy na świecie stanowią istotny zbiornik węgla, zawierają bowiem ponad 80% węgla zmagazynowanego w roślinach lądowych i około 70% węgla zmagazynowanego w glebach [3]. Na terenie Europy lasy zajmują powierzchnię 159 mln ha, co odpowiada 37% powierzchni kontynentu. Średnio pozyskuje się 75% przyrostu surowca na pniu, co prowadzi do średniorocznej akumulacji węgla na poziomie 435 Mt CO<sub>2</sub>[4]. W Polsce, w najpowszechniej występujących borach sosnowych, ogólna pula węgla w ekosystemie wynosi 148 t/ha [5], z czego 91 t przypada na fitomasę a 57 t na węgiel zgromadzony w glebie. Oce na bilansu węgla wskazuje, że w ciągu roku 1,3 t C/ha jest wiązane przez ekosystem w dendromasie i glebie mineralnej, co stanowi 13% produkcji pierwotnej brutto [5]. Oznacza to, że zdecydowana większość dwutlenku węgla pobieranego przez las z atmosfery jest do niej zwracana w trakcie procesów oddychania. W naturalnych lasach tropikalnych wartości te są znacznie większe i sięgają 150-250 t/ha [6].

Lasy stanowią one nie tylko zbiorniki węgla wbudowanego w biomasę czy pochłaniacze CO<sub>2</sub>, ale są także źródłem różnorodnych surowców oraz stanowią odnawialne źródło energii. Lasy wpływają na bilans gazów cieplarnianych w dwojaki sposób. Przede wszystkim pochłaniają dwutlenek węgla z atmosfery, wbudowując go w biomasę. Stanowią więc pochłaniacz węgla, którego część jest dalej transferowana do gleby w toku obumierania biomasy żywej, zaś część pozostaje zmagazynowana w wyrobach powstałych z pozyskanego drewna, część zaś wraca do atmosfery w procesie respiracji. Drugą ważną rolę spełnianą przez lasy jest substytucja paliw kopalnych (w przypadku wykorzystywania biomasy leśnej do celów energetycznych) oraz materiałów (budowlanych, izolacyjnych, opakowań, itp.). Potencjał mitygacyjny lasów oparty jest o naturalny obieg węgla w przyrodzie oraz mechanizm substytucyjny.

Badania naukowe [7] wskazują, że w dłuższym okresie efekty wynikające z substytucji materiałów nieдрzewnych przez produkty drzewne oraz paliw kopalnych przez paliwa drzewne mają większe znaczenie niż efekty zmian zawartości węgla w „zbiorniku CO<sub>2</sub>” jakim jest las.



## 2. Umocowanie leśnictwa w dokumentach politycznych

Ramowa Konwencja narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu (Konwencja Klimatyczna) [8] w artykule 4, nie tylko zobowiązuje do redukcji i ograniczania antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych m.in. w leśnictwie (art. 4, pkt. 1c), ale także do podniesienia efektywności pochłaniaczy gazów cieplarnianych, uwzględniając w tym lasy (art. 4, pkt. 1d). O istotnej roli lasów i leśnictwa świadczy tekst Protokołu z Kioto [9], a w szczególności jego artykuły 3.3 i 3.4. Artykuł 3.3 Protokołu mówi o możliwości włączenia działań z zakresu zalesień, ponownych zalesień i wylesień do realizacji nałożonych zobowiązań w obszarze redukcji emisji gazów cieplarnianych. Artykuł 3.4. umożliwia uwzględnienie działań związanych z prowadzoną gospodarką leśną w realizacji zobowiązań poszczególnych państw, wyszczególnionych w Aneksie I do Protokołu.

Polska nie tylko jest stroną Konwencji Klimatycznej i nie tylko ratyfikowała Protokół z Kioto, ale aktywnie dąży do zwiększenia pochłaniania gazów cieplarnianych, np. poprzez realizację polityki leśnej [10] i zwiększenie lesistości kraju do 30% w 2020 roku i 33% w połowie 21. wieku. Polityka leśna podkreśla trwałą i zrównoważony charakter gospodarki leśnej i jej wielofunkcyjność, co oznacza również realizowanie przez gospodarkę leśną funkcji ochronnych, w tym ochrony klimatu. Akumulacja węgla w biomasie i glebach wpisuje się w pierwsze z kryteriów zrównoważonej gospodarki leśnej (C1). Utrzymywanie i właściwe powiększanie zasobów leśnych ich wkładu do globalnego cyklu węglowego), które przyjęto na jednej z konferencji ministerialnych w sprawie ochrony lasów w Europie [11].

## 3. Leśnictwo jako źródło emisji i pochłaniacz gazów cieplarnianych

Na mocy zobowiązań płynących z protokołu z Kioto Polska corocznie raportuje ilości emisji i pochłaniania dwutlenku węgla, także w ramach działań z kategorii „Użytkowanie ziemi, zmian użytkowania ziemi i leśnictwo” (z ang. LULUCF). Sektor ten jest, z punktu widzenia wpływu gospodarki leśnej na bilans emisji, niezwykle istotny, bowiem w nim tkwią potencjalne możliwości leśnictwa w zakresie obniżania emisji gazów cieplarnianych netto. Sektor ten może przyczynić się do złagodzenia zmian klimatycznych nie tylko poprzez ograniczanie emisji, ale także wskutek utrzymywania i powiększania pochłaniaczy dwutlenku węgla i jego zmagazynowanych zasobów.

Raporty wykonywane dla potrzeb Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w Sprawie Zmian Klimatu (Konwencja Klimatyczna) oraz Protokołu z Kioto uwzględniają leśnictwo w kategorii „Użytkowanie gruntów, zmiany użytkowania gruntów i leśnictwo”. Wśród pięciu sektorów, dla których corocznie raportowane są wielkości emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych (ener-

gia, procesy przemysłowe, rolnictwo, użytkowanie gruntów..., odpady i inne), sektor „Użytkowanie gruntów...”, którego najistotniejszym elementem jest leśnictwo, w roku 2013 odpowiadał za pochłanianie aż 37,6 mln ton CO<sub>2</sub>ekw., co oznacza, że ok. 9% emisji antropogenicznych dwutlenku węgla w Polsce zostało pochłonięte przez lasy. Leśnictwo, dominujące w kategorii „Użytkowanie gruntów, zmiany użytkowania gruntów i leśnictwo”, przez pochłanianie dwutlenku węgla, ma istotny wkład w obniżenie emisyjności gospodarki i jako jedyny sektor wśród objętych sprawozdawczością, jest pochłaniaczem netto.

Jak podaje raport inwentaryzacyjny KOBIZE [12], w roku 2013, wśród kategorii użytkowania gruntów wyróżnionych w sektorze LULUCF, leśnictwo stanowiło największy pochłaniacz netto CO<sub>2</sub> (41422 kt CO<sub>2</sub>), a pozostałe pochłaniacze – grunty orne i pastwiska, odpowiednio 436 i 348 kt CO<sub>2</sub> w znacznie mniejszym stopniu przyczyniły się do usuwania dwutlenku węgla z atmosfery. Biorąc pod uwagę powierzchnie poszczególnych kategorii użytkowania gruntu, okazuje się że w przeliczeniu na jednostkę terenu pochłanianie dwutlenku węgla przez lasy jest największe, sięgając blisko 4,5 tony na ha (tab. 1).

Tabela 1. Wielkości emisji i pochłaniania dwutlenku węgla według kategorii użytkowania gruntów, na podstawie [12]

Table 1. CO<sub>2</sub> emissions and sequestration values for different land use categories, based on [12]

Kategoria użytkowania gruntu	Emisje/ pochłanianie	Powierzchnia	Pochłanianie /emisje jednostkowe
	tony CO <sub>2</sub>		ha
<b>Lasy</b>	-41 421 753	9 369 403	-4,42
<b>Grunty orne</b>	-435 678	14 103 689	-0,03
<b>Pastwiska</b>	-348 425	4 162 123	-0,08
<b>Tereny podmokłe</b>	4 316 309	1 370 864	3,15
<b>Osiedla</b>	262 232	2 163 440	0,12

(znak „-”, oznacza pochłanianie)

Raportowane informacje w zakresie leśnictwa obejmują działania w obszarze zalesiania, ponownego zalesiania, wylesiania oraz gospodarki leśnej. W szczególności uwzględniane są zmiany zasobów węgla w: biomasie nadziemnej, biomasie podziemnej, ściółce, martwym drewnie, glebie leśnej oraz w produktach z pozyskanego drewna. Szczegółowe zasady przygotowywania i prowadzenia rachunku dla tego sektora precyzuje decyzja 539/2013/UE [13].

W obecnym okresie rozliczeniowym emisji, obejmującym lata 2013-2020, sektor leśnictwa rozliczany jest na podstawie ilości emisji i pochłaniania, obliczanych zgodnie z metodyką IPCC [14]. Osobno rozliczeniu podlegają emisje i pochłanianie gazów cieplarnianych powstających w wyniku prowadzenia zalesień, ponownych zalesień oraz wylesień, a osobno te, które powstają w wyniku prowadzenia gospodarki leśnej.

Zawarte w tabeli 2 dane świadczą o znacznym udziale gospodarki leśnej w całkowitej ilości pochłaniania dwutlenku węgla przez sektor leśnictwa. Zalesianie, ponowne zalesianie i wylesianie netto (art. 3.3 Protokołu z Kioto) stanowią jedynie 6% ogólnej ilości pochłoniętego dwutlenku węgla w ostatnich trzech latach sprawozdawczych. Potwierdza to szczególnie ważną rolę prowadzonej gospodarki leśnej (art. 3.4. Protokołu z Kioto) w zakresie pochłaniania gazów cieplarnianych netto. Średnio, cały sektor leśnictwa pochłania rocznie około 40 milionów ton dwutlenku węgla.

Tabela 2. Wielkości emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych dla leśnictwa, raportowanych w ramach zobowiązań wynikających z Protokołu z Kioto, na podstawie [15]

Table 2. Emission and sequestration of GHGs for forestry, reported according to Kioto Protocol requirements, based on [15]

Działanie	Art. 3.3. Protokołu z Kioto			Art. 3.4 Protokołu	Razem leśnictwo
	Zalesianie i ponowne zalesianie	Wylesianie	Razem	Gospodarka leśna	
tys. ton CO <sub>2</sub>					
<b>2011</b>	-2,660	0,225	-2,435	-37,359	-39,794
<b>2012</b>	-2,717	0,247	-2,470	-36,838	-39,308
<b>2013</b>	-2,291	0,202	-2,089	-39,131	-41,220
<b>Średnio</b>	-2,556	0,225	-2,331	-37,776	-40,107

Zgodnie z obowiązującą w obecnym okresie rozliczeniowym metodyką obliczania ilości emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych powstających w wyniku prowadzenia gospodarki leśnej, coroczny bilans emisji i pochłaniania przyrównuje się do poziomu odniesienia (FMRL Forest Management Emissions Level) i dopiero powstały wynik wskazuje na ilość emisji lub pochłaniania, które można wykazać w krajowych bilansach. Poziom odniesienia został określony na 27,133 mln ton CO<sub>2</sub>, i zgłoszony przez Polskę do Sekretariatu Konwencji klimatycznej. W tabeli 3 przedstawiono uśrednione wartości pochłaniania CO<sub>2</sub> w wyniku prowadzenia gospodarki leśnej, porównano je z poziomem odniesienia dla Polski oraz dodano wartości pochłaniania z zalesień/wylesień, obliczając całkowitą ilość pochłaniania CO<sub>2</sub> ekw.

Z racji tego, że obecnie opracowywany jest system tzw. leśnych gospodarstw węglowych [16], zmierzający do wprowadzenia pochłanianych przez leśnictwo jednostek dwutlenku węgla do obrotu handlowego obliczono potencjalne przychody z tytułu sprzedaży jednostek pochłanianego dwutlenku węgla, zakładając aktualną cenę jednej tony CO<sub>2</sub>. Przedstawiają to dwie ostatnie kolumny wspomnianej tabeli 3. Przy aktualnej cenie dwutlenku węgla oscylującej wokół poziomu 5 Euro/tonę CO<sub>2</sub> oznaczałoby to, że można by spodziewać się przychodów na poziomie około 65-70 milionów Euro rocznie.

Tabela 3. Potencjalne przychody z tytułu pochłaniania CO<sub>2</sub> przez sektor leśnictwaTable 3. Potential incomes from CO<sub>2</sub> sequestration by the forestry sector

Pochłanianie z gospodarki leśnej	Poziom odniesienia	Nadwyżka	Zalesienia i wylesienia	Razem leśnictwo	Cena CO <sub>2</sub>	Przychód
tys. ton CO <sub>2</sub> /rok					EUR/t CO <sub>2</sub>	mln EUR/rok
1	2	3(1-2)	4	5(3+4)	6	7(6x5)
-37 776	-27 133	-10 643	-2 331	-12 975	5,38*	69,7

\*Cena na dzień 01.04.2016r wg [17]

#### 4. Podsumowanie

Prowadzenie gospodarki leśnej, a więc głównie czynności z zakresu hodowli, ochrony i użytkowania lasu prowadzą do stałego wiązania dwutlenku węgla w ekosystemie leśnym i w produktach drzewnych substytuujących inne materiały nieдрzewne, jak np. stal, beton. Prowadzenie gospodarki leśnej, m.in. poprzez optymalizację składu gatunkowego, ochronę gleby, silniejszą ochronę przed zjawiskami katastrofalnymi i zwiększenie rezerwuaru produktów z pozyskanego drewna przyczynia się do pochłaniania CO<sub>2</sub> z atmosfery znacznie bardziej niż zalesianie terenów nieleśnych. Przytoczone powyżej spostrzeżenia świadczą o tym, że zwiększanie pojemności i zdolności magazynowania dwutlenku węgla przez sektor leśnictwa nie ogranicza się jedynie do zachowania ekosystemu leśnego, ale obejmuje także aktywne gospodarowanie tym ekosystemem. Pochłanianie CO<sub>2</sub> może, po włączeniu leśnictwa do systemu handlu emisjami, być potencjalnym źródłem istotnych korzyści materialnych, sięgających 70 mln Euro. Działalność człowieka, która, jak się powszechnie uważa, przyczyniła się do wystąpienia niekorzystnych i niebezpiecznych w swoich skutkach zmian klimatycznych, może także prowadzić do ich zahamowania lub odwrócenia. Leśnictwo może być tutaj dobrym przykładem takich działań.

#### Literatura

- [1] Lindahl K. B., Westholm E. (red.) 2015. Trender i varlden. Rapport fran Future Forests 2009-2012. Future Forests rapport serie 2015:1. Sverigeslantbruksuniversitet, Umea.
- [2] Encyklika Laudato Si' Ojca Świętego Franciszka poświęcona trosce o wspólny dom. Wyd. Diecezji Warszawsko-Praskiej. Warszawa 2015.
- [3] Post W. M., Emanuel W. R., Zinke P. I., Stagenberger A. G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 298: 156-159.
- [4] Nabuurs G-J., Delacote P., Ellison D., Hanewinkel M., Lindner M., Nesbit M., Ollikainen M., Saveresi A. 2015. A new role for forests and the forest sector in the EU post-2020 climate targets. Form science to policy 2. European Forest Institute. www.efi.int. {data dostępu 16.03.2016 r.}.

- [5] Zwoliński J. 1998. Obieg węgla w borach sosnowych. Prace IBL, Seria A. pp. 141-155.
- [6] Koskela J., Nygren P., Berninger F., Luukkanen O. 2000. Implications of the Kyoto Protocol on tropical forest management and land use: prospects and pitfalls. Tropical forestry reports. University of Helsinki. Helsinki.
- [7] Lundmark T., Bergh J., Hofer P., Lundstrom A., Nordin A., Podel B.C., Sathre R., Taverna R., Werner F. 2014. Potential roles of Swedish forestry in the context of climate change mitigation. *Forests*. 5. Pp. 557-578. ([www.mdpi.com/journal/forests](http://www.mdpi.com/journal/forests)) {data dostępu: 31.03.2016 r.}.
- [8] Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu. 1992. [https://www.mos.gov.pl/fileadmin/user\\_upload/srodowisko/Ramowa\\_Konwencja\\_Narodow\\_Zjednoczonych\\_w\\_sprawie\\_zmian\\_klimatu.pdf](https://www.mos.gov.pl/fileadmin/user_upload/srodowisko/Ramowa_Konwencja_Narodow_Zjednoczonych_w_sprawie_zmian_klimatu.pdf) {data dostępu: 17.03.2016 r.}.
- [9] Protokół z Kioto do Ramowej konwencji w sprawie zmian klimatu. 1997 ([https://www.mos.gov.pl/fileadmin/user\\_upload/srodowisko/Protokol\\_z\\_Kioto\\_do\\_Ramowej\\_Konwencji\\_Narodow\\_Zjednoczonych\\_w\\_sprawie\\_zmian\\_klimatu.pdf](https://www.mos.gov.pl/fileadmin/user_upload/srodowisko/Protokol_z_Kioto_do_Ramowej_Konwencji_Narodow_Zjednoczonych_w_sprawie_zmian_klimatu.pdf)) {data dostępu: 18.03.2016 r.}.
- [10] Polityka Leśna Państwa. 1997. ([https://www.mos.gov.pl/g2/big/2009\\_04/34ba398d45e363aed16d2ad3b015136a.pdf](https://www.mos.gov.pl/g2/big/2009_04/34ba398d45e363aed16d2ad3b015136a.pdf)) {data dostępu: 18.03.2016 r.}.
- [11] Aneks 1 do rezolucji L2 „Paneuropejskie Kryteria i Wskaźniki zrównoważonej gospodarki leśnej”. Trzecia Konferencja Ministrów w Sprawie Ochrony Lasów w Europie 2-4 Czerwca 1998 roku, Lizbona, 1998 ([https://www.mos.gov.pl/g2/big/2009\\_04/c5fd1336a465a7f2c876dfbac9f9c8ad.pdf](https://www.mos.gov.pl/g2/big/2009_04/c5fd1336a465a7f2c876dfbac9f9c8ad.pdf)) {data dostępu: 29.03.2016 r.}.
- [12] Poland's National Inventory Report 2015. 2015. KOBiZE in IOŚ-PAB. Warszawa.
- [13] Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady Nr 539/2013/UE z dnia 21 maja 2013 w sprawie zasad rozliczania emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w wyniku działalności związanej z użytkowaniem gruntów, zmianą użytkowania gruntów i leśnictwem oraz informacji o działaniach związanych z tą działalnością. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 165/80 z 18.6.2013.
- [14] IPCC 2014. 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds) IPCC, Switzerland.
- [15] National reports [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/8812.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8812.php) {data dostępu 18.03.2016 r.}.
- [16] Drabarczyk J. 2016. Zatrzymać węgiel w lesie. *Głos lasu*. Nr 1, ss. 12-14.
- [17] <http://www.handel-emisjami.pl/> {data dostępu: 01.04.2016 r.}.

## ROLES OF FORESTS AND FOREST MANAGEMENT IN SEQUESTRATION OF GREENHOUSE GASES

### Summary

Among activities leading to climate change mitigation forests and active forest management play an important role. Forests are not only a carbon dioxide sink, but they are also a vital source of wood products and forest biomass, providing substitutes for non-wood materials and fossil fuels. Today, information about afforestation, deforestation and forest management is a part of yearly reports, submitted, according to the requirements of the climate convention and Kyoto Pro-

toocol. Among the sectors covered by the reporting, only the category Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF) is a net GHG sink. In Poland in the LULUCF sector, forests are the largest carbon dioxide sink per area unit, reaching a value of 4,42 t CO<sub>2</sub>/ha. Forest management contributes to the sequestration of carbon dioxide in a much larger degree than net afforestation. The average CO<sub>2</sub> sequestration due to forest management in Poland in recent years amounted to nearly 38 mill. tons per year, while the net sequestration resulting from afforestation/deforestation activities reached over 2 mill. tons CO<sub>2</sub>. As calculations show, bringing CO<sub>2</sub> sequestration units due to forest management into the emissions trading system could provide an income of about 70 mill. Euros per year. The existence of forests as ecosystems contributes to the sequestration of carbon dioxide, but active forest management plays an even more important role in carbon sequestration, which puts forestry into a position of a vital factor mitigating climate change and calls for a rapid inclusion of the LULUCF sector in the emissions reduction goals.

**Keywords:** forest management, carbon sequestration, CO<sub>2</sub> sink, substitution

*Przesłano do redakcji: 7.07.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Krzysztof BARAN<sup>1</sup>  
Marcin LEŚKO<sup>2</sup>  
Henryk WACHTA<sup>3</sup>

## WIZUALIZACJA PRZEDWOJENNEJ ZABUDOWY DZIELNICY ŻYDOWSKIEJ W PRZEMYSŁU

Dostępne obecnie aplikacje graficzne i moc obliczeniowa komputerów pozwalają na tworzenie złożonych modeli oraz animacji komputerowych. Powyższe aplikacje znalazły szerokie zastosowanie m.in. w architekturze do wirtualnej rekonstrukcji obiektów historycznych. Na podstawie archiwalnych map i zdjęć, tworzone są komputerowe modele obiektów, które pozwalają na odtworzenie i zobrazowanie istniejącej kiedyś zabudowy. Modelowanie komputerowe umożliwia również w stosunkowo krótkim czasie na wielowariantową koncepcję rekonstrukcji obiektu, co jest nieodzownym elementem wyboru optymalnej wersji rzeczywistej rekonstrukcji. W artykule przedstawiono komputerowe wizualizacje zabudowy Dzielnicy Żydowskiej w Przemysłu. Na podstawie dostępnych archiwalnych map i zdjęć zlokalizowano oraz zwymiarowano przedwojenne obiekty wchodzące w skład zabudowy Dzielnicy Żydowskiej. Przy wykorzystaniu zaawansowanej aplikacji graficznej 3ds Max Studio zwizualizowana została zabudowa Dzielnicy Żydowskiej, w skład której wchodziły m.in. Synagoga Tempel, Stara Synagoga, Sąd Grodzki oraz liczne zespoły kamienic. W artykule przedstawiono utworzone modele wybranych obiektów, rekonstrukcję komputerową całej Dzielnicy Żydowskiej, jak również przykład współczesnej aranżacji przestrzennej rekonstruowanej dzielnicy.

**Słowa kluczowe:** obiekty historyczne, rekonstrukcja, komputerowa wizualizacja, model komputerowy 3d, rendering

### 1. Wprowadzenie

Rekonstrukcja architektoniczna ma na celu odtworzenie obiektu lub jego części w formach historycznych, z wykorzystaniem zachowanych, oryginalnych elementów i detali [1]. Obecnie, wraz z postępem i rozwojem grafiki komputerowej, szczególne znaczenie w architekturze ma rekonstrukcja komputerowa, gdzie przy

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Krzysztof Baran, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów; tel. 177432434; kbaran@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Marcin Leško, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów; tel. 177432434; mlesko@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Henryk Wachta, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651977; hwachta@prz.edu.pl

wykorzystaniu aplikacji graficznych możliwe jest dokładne odtworzenie istniejących kiedyś obiektów architektonicznych [2]. Na podstawie archiwalnych map i zdjęć tworzony jest trójwymiarowy model obiektu, który następnie prezentowany jest na tle istniejącego zabudowania. Wykonana w ten sposób wizualizacja, umożliwia zobrazowanie w sposób bardzo zbliżony do rzeczywistego, przyjętej koncepcji rekonstrukcji obiektu. Komputerowe modelowanie umożliwia w dość szybki sposób przeanalizowanie wielu wariantów koncepcyjnych odbudowy obiektu, dzięki czemu, projektant na etapie wizualizacji ma możliwość wyboru optymalnego rozwiązania wpisującego się w istniejący stan zabudowy.

W artykule przedstawiono przykład komputerowego odtworzenia Dzielnicy Żydowskiej w Przemyślu. Z wykorzystaniem oprogramowania 3ds Max Studio odbudowane zostały główne obiekty zabudowy zniszczonej podczas II Wojny Światowej oraz przedstawiono możliwość współczesnej aranżacji zrekonstruowanej dzielnicy.

## **2. Historyczna zabudowa Dzielnicy Żydowskiej w Przemyślu**

Przemyśl od wieków był miastem, w którym ścierały się różne kultury oraz narodowości. Liczną grupę ludności, oprócz Polaków i Rusinów stanowiła tutaj ludność żydowska i na początku XX wieku, liczebność ta wynosiła ok. 30% populacji całego miasta.

Pierwsze wzmianki o ludności pochodzenia żydowskiego w Przemyślu pochodzą już z XI wieku, jednak na okres przypadający na drugą połowę XVI wieku, datuje się gwałtowny wzrost liczebności ludności żydowskiej, co związane było z nadaniem znacznych przywilejów rodzinom żydowskim przez króla Zygmunta Augusta. Druga połowa XVI wieku uznawana jest również za początek powstania Dzielnicy Żydowskiej w Przemyślu [3].

Dzielnica Żydowska znajdowała się pomiędzy ul. Wodną, ul. Jagiellońską oraz obecną ul. Kazimierzowską. Do najważniejszych obiektów wchodzących w skład dzielnicy wchodziły m.in.: Sąd Grodzki, Synagoga Tempel, Stara Synagoga oraz zespół kamienic.

Na rys. 1 została przedstawiona jedna z zachowanych pocztówek przedstawiająca przedwojenną zabudowę Dzielnicy Żydowskiej.

Działania wojenne sprawiły, że większość obiektów związanych z kulturą żydowską zostało zniszczonych, zachowały się jedynie dwie synagogi oraz cmentarz żydowski. Obecnie w miejscu Dzielnicy Żydowskiej znajduje się pusty plac, częściowo pełniący funkcję parkingu.

## **3. Komputerowa rekonstrukcja zabudowy Dzielnicy Żydowskiej**

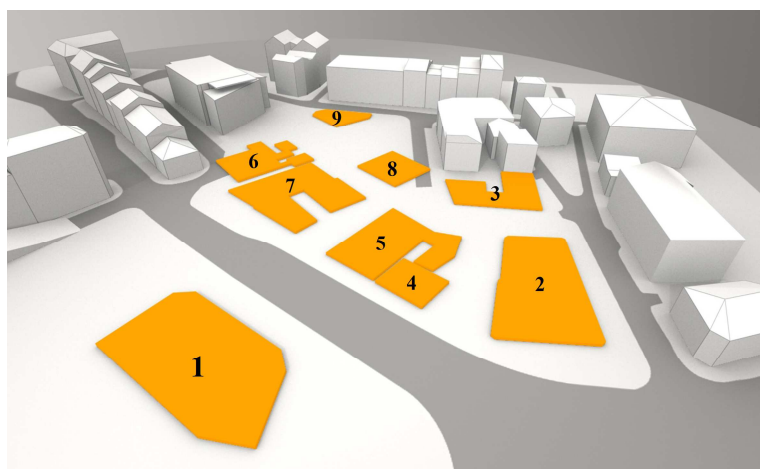
Na podstawie archiwalnych map i zdjęć ustalono lokalizację oraz gabaryty przedwojennych obiektów znajdujących się w Dzielnicy Żydowskiej. Na rys. 2 przedstawiono granice obiektów rekonstruowanych oraz istniejąca obecnie zabudowa.





Rys. 1. Przedwojenna pocztówka przedstawiająca Dzielnicę Żydowską [4]

Fig. 1. Pre-war postcard showing Jewish District [4]



Rys. 2. Granice odtwarzanych obiektów oraz istniejąca zabudowa: 1 - Kamienica Nussbauma, 2 - Sąd Grodzki, 3 - Zespół kamienic przy ul. Wodnej, 4 - Synagoga Tempel, 5 - Zespół kamienic przy Synagodze Tempel, 6 - Stara Synagoga, 7 - Zespół kamienic przy Starej Synagodze, 8 - Kamienica w centrum Placu Berka Joselewicza, 9 - Kamienica przy ulicy Ratuszowej

Fig. 2. Boundaries of the reconstructed buildings and existing buildings : 1 - Nussbaum's house, 2 - Grodzki Court, 3 - Tenement houses on the Water Street, 4 - Tempel Synagogue, 5 - Tenement houses about Tempel Synagogue, 6 - Old Synagogue, 7 - Tenement houses about Old Synagogue, 8 - House in the center Berk Joselewicz square, 9 - House on the Town Hall Street

### 3.1. Sąd Grodzki

Jednym z nielicznych obiektów Dzielnicy Żydowskiej, do którego zachowała się obszerna dokumentacja fotograficzna jest Sąd Grodzki. Był to budynek dwupiętrowy posiadający dużą ilość zdobień. Budynek ten zawierał charakterystyczne obramowania okienne, złożone gzymsy, ornamenty międzyokienne czy zdobnicze elementy dachu.

Na rys. 3 przedstawiono wykonany w oprogramowaniu 3ds Max Studio model Sądu Grodzkiego. Model ten jest bryłą o dużym stopniu złożoności co związane jest z dokładnym odwzorowaniem licznych detali.



Rys. 3. Model komputerowy Sądu Grodzkiego [6]

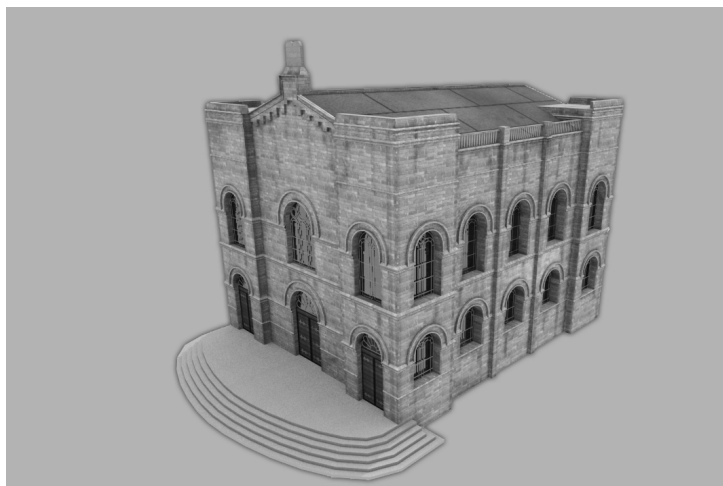
Fig. 3. Computer model of the Grodzki Court [6]

### 3.2. Synagoga Tempel

Kolejnym charakterystycznym obiektem wchodzącym w skład zabudowy Dzielnicy Żydowskiej była synagoga Tempel (rys. 4.). Obiekt ten wybudowany został końcem XIX w., murowany z czerwonej cegły na planie kwadratu. Do wejścia prowadziły szerokie schody, a charakterystycznym elementem synagogi były tablice Dekalogu wzniesione ku górze na frontowej ścianie [5].

### 3.3. Stara Synagoga

Synagoga zbudowana została końcem XVI w., odrestaurowana początkiem XIX w., niestety doszczętnie zniszczona działaniami wojennymi w 1941 r. (rys. 5.). Początkowo obiekt ten składał się z prostokątnej sali głównej, jednak w późniejszych latach dobudowane zostały liczne przybudówki, czego końcowym efektem była skomplikowana bryła obiektu [5].



Rys. 4. Model komputerowy Synagogi Tempel [6]

Fig. 4. Computer model of the Tempel Synagogue [6]



Rys. 5. Odtworzony komputerowo model Starej Synagogi [6]

Fig. 5. Computer model of the Old Synagogue [6]

### 3.4. Dzielnica Żydowska

Oprócz przedstawionych powyżej modeli, odtworzony został również zespół kamienic znajdujący się w sąsiedztwie wymienionych obiektów. Na rys. 6 i 7 przedstawiono całkowicie odtworzoną zabudowę przedwojennej Dzielnicy Żydowskiej. Białymi bloczkami zostały oznaczone istniejące obecnie zabudowania.



Rys. 6. Wirtualna rekonstrukcja zabudowy Dzielnicy Żydowskiej [6]

Fig. 6. Virtual reconstruction of buildings Jewish District [6]



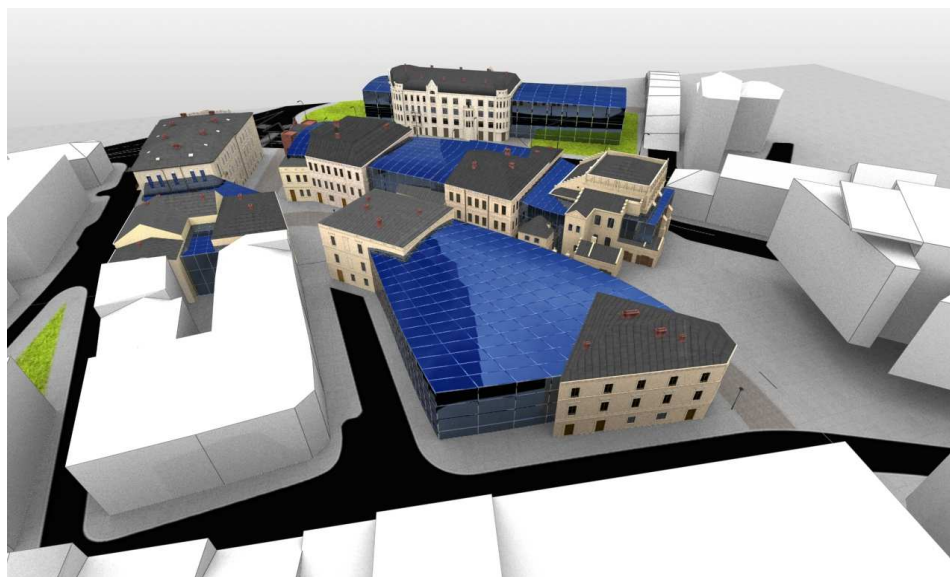
Rys. 7. Wizualizacja zabudowy Dzielnicy Żydowskiej [6]

Fig. 7. Visualisation of buildings Jewish District [6]

#### **4. Przykład współczesnej aranżacji przestrzennej dawnej Dzielnicy Żydowskiej**

W związku z obecnym planem miasta odnośnie zagospodarowania dawnej Dzielnicy Żydowskiej, który zakłada możliwość budowy obiektu wielkopowierzchniowego w tym miejscu, na rys 8. został przedstawiony przykład

współczesnej aranżacji wymienionego obszaru. Odtworzone obiekty historyczne połączone zostały szklanymi ścianami z metalowymi elementami konstrukcyjnymi. Przedstawiony wariant umożliwia umieszczenie pasaży handlowych i punktów usługowych wewnątrz obiektów, jednocześnie łącząc historyczne elewacje z nowoczesną formą i wyglądem.



Rys. 8. Przykład współczesnej aranżacji Dzielnicy Żydowskiej [6]

Fig.8. Example of modern arrangement Jewish District [6]

## 5. Wnioski

Modelowanie komputerowe stanowi jedną z głównych metod wirtualnej rekonstrukcji obiektów zabytkowych. Zaawansowane aplikacje graficzne umożliwiają precyzyjne odtworzenie istniejącej w przeszłości zabudowy, często o znaczeniu historycznym. Utworzone w ten sposób wizualizacje umożliwiają zobrazowanie istniejącej kiedyś zabudowy, dzięki czemu wykorzystywane są szeroko m.in. w muzealnictwie, np. do wirtualnego spaceru 3D.

W artykule zaprezentowano wirtualną rekonstrukcję dawnej Dzielnicy Żydowskiej w Przemyślu. Stworzone wizualizacje komputerowe umożliwiły odtworzenie bogatej i różnorodnej zabudowy Przemyśla, brutalnie zniszczonej działaniem nazistowskich Niemiec w okresie II wojny światowej.

## Literatura

- [1] Kowalski T.: Rekonstrukcja zabytków architektury, Teoria a praktyka, Wydawnictwo PKZ, Warszawa 1985.
- [2] Kulig A.: Rekonstrukcje architektoniczne – źródła i metody odtworzeń zabytków, Czasopismo Techniczne, z.7-A/2008, str.75-85.
- [3] Błoński J.: Zaginiony świat-historia Żydów przemyskich, Przemysł 2008.
- [4] [www.wojnowp.republika.pl/zydzi/z1a.html](http://www.wojnowp.republika.pl/zydzi/z1a.html) {dostęp 13.06.2016 r.}.
- [5] Koperski A, Rejniewicz Ł.: Tajemnice placu Berka Joselewicza w Przemysłu. Rezultat badań w rejonie żydowskiego miasta. Muzeum Narodowe Ziemi Przemyskiej, Przemysł 2006.
- [6] Praca wykonana w ramach działalności Koła Naukowego Elektroenergetyk (opiekun koła: dr inż. Henryk Wachta).

*Praca została zrealizowana z wykorzystaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu: "Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej", współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Projektu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Oś priorytetowa 1 – Konkurencyjna i innowacyjna gospodarka.*

## RECONSTRUCTION OF THE BUILDINGS OF THE JEWISH DISTRICT IN PRZEMYŚL

### Summary

The currently available graphic applications and the computing power of the computers allow you to create complex models and computer animations. These applications are widely used, among others, in architecture for the reconstruction of historical buildings. On the basis of archival maps and images, the computer models of the buildings are created, which allow you to reconstruct and illustrate the once existing buildings. Computer modelling also enables, in a relatively short time, the multi-variant concept of the building reconstruction, what is an indispensable element of choosing the optimal version of the real reconstruction.

The article presents the computer reconstruction of the buildings of the Jewish District in Przemysł. On the basis of the available archival maps and photos it was possible to locate and dimension the pre-war buildings belonging to the buildings of the Jewish District. By using the advanced graphics application of 3ds Max Studio the buildings of the Jewish District were reconstructed, which included, among others, the Tempel Synagogue, the Old Synagogue, the Grodzki Court and numerous complexes of tenement houses. The article presents the created models of the selected objects, the computer reconstruction of the whole Jewish District, as well as the example of the modern spatial arrangement of the reconstructed district.

**Keywords:** historical objects, reconstruction, visualization, 3d computer model, rendering

*Przesłano do redakcji: 17.06.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.*

Mateusz SZUBEL<sup>1</sup>  
Magdalena PAPKA<sup>2</sup>  
Mariusz FILIPOWICZ<sup>3</sup>

## ZASTOSOWANIE OBLICZENIOWEJ MECHANIKI PŁYNÓW W WIELOWARIANTOWEJ ANALIZIE HOMOGENICZNEGO SPALANIA PRODUKTÓW ZGAZOWANIA BIOMASY

Z uwagi na konieczność dywersyfikacji źródeł energii, pod koniec ubiegłego stulecia uwaga producentów kotłów zwróciła się ku technologiom opartym na odnawialnych surowcach energetycznych. Dużą popularność zyskała biomasa pochodzenia roślinnego, obecnie coraz częściej stosowana do produkcji ciepła w energetyce rozproszonej. Na terenach wiejskich stosowanie kotłów wsadowych zasilanych słomą niesie za sobą znaczne korzyści ekonomiczne. Jednostki te są także przyjazne środowisku, przy czym z uwagi na dużą zawartość części lotnych w paliwie i intensywność jego zgazowania w komorze spalania, proces musi być prowadzony przy zapewnieniu odpowiedniej konstrukcji systemu podawania powietrza, a także przy zastosowaniu dedykowanego algorytmu sterującego w/w systemem. Niniejszy artykuł opisuje analizę CFD kotła wsadowego o mocy 100 kW, zasilanego słomą w postaci prostopadłościennych balotów. Konstrukcja analizowanej jednostki grzewczej została opracowana na podstawie wyników prac eksperymentalnych i numerycznych przeprowadzonych na kotle wsadowym o standardowej konstrukcji. Do budowy modelu numerycznego i przeprowadzenia obliczeń wykorzystano moduły pakietu ANSYS Workbench 15. Dyskretyzację domeny ciągłej przeprowadzono narzędziem ANSYS Meshing. Do obliczeń modelu zastosowano solver ANSYS Fluent. Chemizm procesu spalania opisano za pomocą zredukowanych mechanizmów reakcji. Zaprezentowane wyniki dotyczące rozkładu temperatury, koncentracji substratów i produktów reakcji chemicznych oraz turbulentności ich strumieni w komorze wtórnej zostały omówione pod kątem kolejnych planowanych zmian, m.in. w zakresie sposobu doprowadzania powietrza.

**Słowa kluczowe:** spalanie, biomasa, kotły, modelowanie, CFD

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Mateusz Szubel, AGH w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126173428; mszubel@agh.edu.pl

<sup>2</sup> Magdalena Papka, AGH w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; papkamagda@gmail.com

<sup>3</sup> Mariusz Filipowicz, AGH w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126175192; filipow@agh.edu.pl



## 1. Wprowadzenie

Zjawiska charakterystyczne dla pracy kotłów na biomasę opisane pokrótce w niniejszym artykule dowodzą faktu, iż mimo relatywnie prostej konstrukcji, spalanie w tego typu jednostkach jest niezwykle skomplikowanym procesem [1, 2]. W porównaniu do kotłów na paliwa konwencjonalne (w tym węgiel kawałkowy i „ekogroszek”, olej opałowy czy gaz ziemny), procesy zachodzące w komorach spalania urządzeń zasilanych biomasą są zdecydowanie mniej przewidywalne, a samo spalanie przebiega w sposób bardziej gwałtowny i zmienny (zarówno w zakresie czasowych i przestrzennych rozkładów temperatury jak i emisji zanieczyszczeń) [3, 4]. Determinuje to konieczność prowadzenia zaawansowanych, czasochłonnych i kosztownych prac w celu optymalizacji spalania w w/w jednostkach grzewczych.

Naprzeciw wymaganiom związanym z takimi badaniami wychodzą metody komputerowe, wśród których na szczególną uwagę zasługuje obliczeniowa mechanika płynów CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*). CFD bazując przede wszystkim na tzw. metodzie objętości skończonych umożliwia prześledzenie procesów zachodzących w komorze spalania danego kotła, bez konieczności budowy wielu prototypów, skracając tym samym czas i koszt badań [5, 6].

Zespół Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego Wydziału Energetyki i Paliw AGH w Krakowie wykorzystuje CFD do analiz procesów spalania w komercyjnych kotłach zasilanych biomasą. Wsparcie testów prowadzonych na stanowiskach doświadczalnych symulacjami CFD umożliwiło m.in. opracowanie nowej jednostki grzewczej. Obecnie, na etapie budowy instalacji w/w kotła prowadzone są analizy CFD, umożliwiające wstępne określenie rekomendowanych warunków jego pracy, jeszcze przed rozruchem.

## 2. Proces spalania a piroliza i zgazowanie biomasy

Spalanie biomasy obejmuje liczne procesy fizykochemiczne o wysokim stopniu złożoności [7, 8]. Rozpatrując w/w grupę paliw, należy zwrócić szczególną uwagę na dużą zawartość wilgoci i części lotnych, co determinuje cztery ogólne fazy spalania: nagrzewanie i suszenie, termiczna dekompozycja komponentów paliwa, spalanie produktów rozkładu termicznego, spalanie pozostałości koksowej.

Piroliza biomasy to niekompletny rozkład termiczny, którego produktami są: karbonizat, kondensaty, smoła oraz gaz. Wśród produktów ciekłych należy wymienić wodę, kwas octowy i mrówkowy, aceton, formaldehyd, acetaldehyd, fenol, toluen i wiele innych. Natomiast najważniejsze składniki gazu pirolitycznego to wodór, para wodna, tlenek węgla, dwutlenek węgla, metan oraz wysokouwęglone węglowodory. Smoła stanowi mieszaninę związków aromatycznych [9]. Konwencjonalna piroliza prowadzi do wspomnianego wyżej formowania karbonizatu. W pirolizie szybkiej natomiast należy się spodziewać powstawania większej ilości ciekłych węglowodorów [7, 8].



Zgazowanie biomasy zachodzi przy udziale czynnika zgazowującego i niedoborze tlenu, przy czym proces może być alotermiczny i autotermiczny. Prekursorem procesu zgazowania jest piroliza lignino-celulozy z wydzielaniem części lotnych [8, 9]. Czynniki zgazowujące reagują ze stałym węglem oraz złożonymi węglowodorami wchodzącymi w skład lotnych produktów pirolizy, czego wynikiem jest ich przekształcenie w gazy o niewielkiej masie cząsteczkowej, jak tlenek węgla (CO) i wodór (H<sub>2</sub>).

### **3. Obliczeniowa mechanika płynów w badaniach kotłów na biomasę**

Xue, Heindel i Fox w swojej pracy [10] zaproponowali model CFD do opisu procesu ciągłej szybkiej pirolizy biomasy w reaktorze ze złożem fluidalnym. Autorzy artykułu definiując kinetykę reakcji uwzględnili fakt wielostopniowości rozpatrywanego procesu, jak i występowanie w paliwie różnych składników, charakteryzujących się specyficznymi właściwościami: celulozy, hemicelulozy i ligniny. Analiza uwzględniała dynamikę ogrzewania cząstek paliwa, reakcje w fazie stałej, w tym proces formowania karbonizatu, a także przestrzenny rozkład smoły i gazów w reaktorze. Podobne zagadnienia są podejmowane w pracy Blondeau i Jeanmart [11], gdzie zaproponowano rozbudowany model opisujący pirolizę cząstek paliwa w kotle pyłowym.

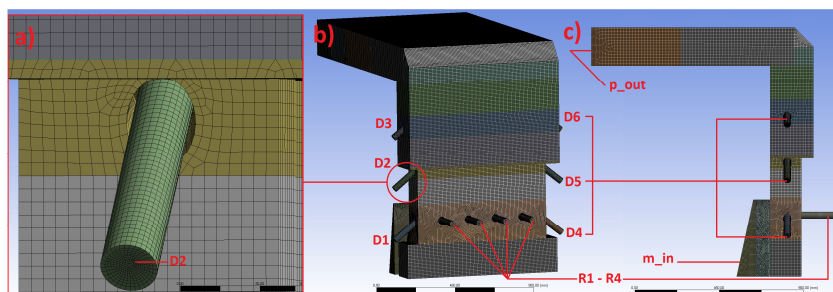
Wyniki modelowania podstawowych zjawisk towarzyszących pirolizie drobin paliwa, jak również dane uzyskane w wyniku prac eksperymentalnych często są wykorzystywane do prowadzenia symulacji bardziej złożonych układów, w tym palenisk ze stałym złożem paliwa [12, 13]. Budowa modelu numerycznego opisującego heterogeniczne spalanie biomasy, przy uwzględnieniu danych doświadczalnych i walidacji wyników obliczeń, pozwala na prowadzenie analiz wariantowych, skoncentrowanych m.in. na parametrach takich jak wpływ na proces i bilans cieplny jednostki współczynnika nadmiaru powietrza, zastosowania stopniowania powietrza, czy choćby ustawienia i kierunku wlotów powietrza pierwotnego i wtórnego [14, 15, 16].

W oparciu o dane literaturowe możliwe jest przygotowanie symulacji numerycznych kotłów wsadowych niewielkiej mocy zasilanych słomą. Obecnie takie zastosowanie CFD dopiero zyskuje popularność, przy czym istnieją już opracowania opisujące modele pracy urządzeń spalających słomę [17]. W dalszej części niniejszej pracy opisano budowę modelu kotła typu EKOPAL RM-30, przystosowanego konstrukcyjnie do zaawansowanych testów eksperymentalnych (dodatkowe dysze powietrza wtórnego, liczne króćce montażowe czujników itp.).

#### 4. Model CFD procesu spalania w komorze wtórnej kotła wsadowego zasilanego słomą

W ramach opisywanych analiz opracowano model CFD oparty na uśrednieniu Reynoldsa w stanie pseudoustalonym (ang. Reynolds Averaged Navier – Stokes – RANS) procesu homogenicznego spalania, obejmujący komorę wtórną wraz z sekcją odstoju pyłów kotła zasilanego słomą. W badanym typie jednostek w komorze wtórnej następuje dopalenie produktów zgazowania słomy (zachodzącego w komorze pierwotnej), przy udziale powietrza wtórnego dostarczanego przez dysze umieszczone na bocznych ścianach komory. Motywacją do budowy modelu był fakt, iż stopień dopalenia w/w związków, a przez to także strata niezupełnego spalania oraz strata kominowa są ściśle związane z liczbą punktów podawania powietrza wtórnego oraz ich rozlokowaniem. Wynika to z konieczności zapewnienia odpowiedniej turbulencji przepływu gazów oraz dostępności utleniacza w obszarze reakcji chemicznych.

Rysunek 1 przedstawia geometrię modelowanej komory wtórnej po procesie dyskretyzacji (generacji siatki), w wyniku której uzyskano  $1,7435 \cdot 10^6$  objętości skończonych. Siatka została poddana walidacji. Współczynnik jakości obliczany na podstawie stosunku objętości elementu siatki do sumy jego krawędzi osiągnął średnią wartość 0,9, przy czym  $1,31 \cdot 10^6$  elementów cechowało się wartością wskaźnika równą 0,95 (im wynik bliższy jest liczbie 1, tym wyższa jakość elementu siatki, im bliższy 0 tym gorsza jakość).



Rys. 1. Geometria przestrzenna komory wtórnej (część pionowa) i odstoju pyłów (górna część pozioma) po przeprowadzeniu dyskretyzacji domeny ciągłej – zbliżenie prezentujące siatkę obliczeniową (a), widok 3D (b): R1 – R4–dysze powietrza pierwotnego, D1–D6–dysze powietrza wtórnego, oraz widok z boku (c): m\_in–wlot produktów zgazowania do komory wtórnej (wydzielony trójkątny kształt stanowi fragment komory pierwotnej wypełnionej słomą), p\_out–wylot spalin z obszaru domeny obliczeniowej

Fig. 1. Spatial geometry of the secondary chamber (vertical part) and the ash separator (top horizontal part) after the process of discretization of the computational domain – zoom presenting computational grid (a), 3D view (b): R1 – R4–primary air nozzles, D1 – D2–secondary air nozzles, and side view (c): m\_in–inlet of products of the gasification to the chamber (separated triangle element is part of the primary chamber filled by straw), p\_out–outlet of exhaust from the computational domain

Tabela 1. Warunki brzegowe wlotowe w analizowanych wariantach doprowadzania powietrza

Table 1. Inlet boundary conditions in analyzed variants of air feeding

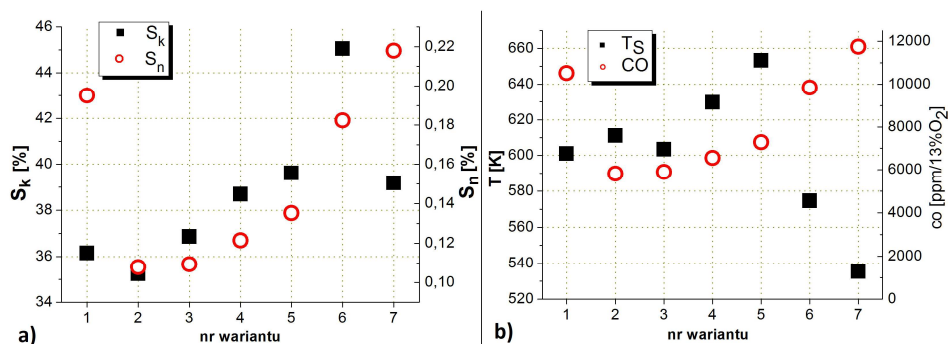
Wariant	R1	R2	R3	R4	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	[g/s]									
1	15,5	18,5	18,5	15,5	16,6	x	x	16,6	x	x
2					x	16,6	x	x	16,6	x
3					x	x	16,6	x	x	16,6
4					8,4	8,4	x	8,4	8,4	x
5					5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53
6					16,6	16,6	x	16,6	16,6	x
7					16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6

Warunki brzegowe wejściowe obejmowały wlot produktów zgazowania biomasy ( $m_{in} = 0,015\text{kg/s}$ ,  $T = 573,15\text{K}$ ) przez obszar ciała porowatego oraz wloty powietrza pierwotnego i wtórnego. Przeprowadzono symulacje dla kilku wariantów pracy układu doprowadzania powietrza. Tabela 1 zawiera informacje na temat dysz pracujących w poszczególnych badanych wariantach. Na wylocie z komory spalania założono podciśnienie wynikające z rekomendowanego przez producenta ciągu kominowego ( $p_{out} = -20\text{ Pa}$ ).

Równania transportu oparto na modelu turbulencji k- $\epsilon$  realizabile, którego cechą charakterystyczną jest zmodyfikowanie członu dyssypacji turbulencji, a także zastąpienie stałej w innych modelach lepkości turbulentnej zależnością funkcyjną [17]. W modelu promieniowania uwzględniono wpływ jego absorpcji przez cząsteczki trójatomowe (model typu „Weighted sum of gray gases model” – WSGGM).

Aby dobrze odzwierciedlić kinetykę reakcji syntezy i rozpadu o różnym stopniu wpływu turbulencji, konieczne było zastosowanie kombinacji modelu opartego na równaniu Arrheniusa (ang. Finite Rate), odpowiedniego w przypadku wartości parametru Damköhlera w układzie  $Da > 1$  oraz modelu bazującego na stałej mieszania substratów i produktów (ang. Eddy Dissipation), gdzie  $Da < 1$ . W modelu uwzględniono 8 reakcji chemicznych, przy czym w zbiorze substratów wchodzących w skład produktów zgazowania znalazły się:  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HCN}$ , natomiast wśród produktów ich spalania należy wymienić:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$ . Pełny opis chemizmu procesu można znaleźć w [16].

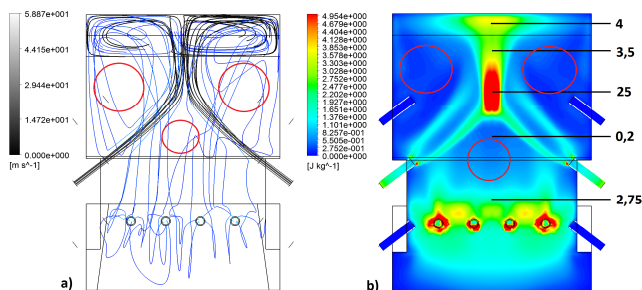
Na podstawie modelu określono wartości istotnych elementów bilansu cieplnego kotła. Rysunek 2a przedstawia wartości straty kominowej (metoda Siegerta) oraz straty niepełnego spalania uzyskane w poszczególnych badanych wariantach. Niniejsze straty wraz z metodologią obliczeń zostały opisane w [9]. Ponieważ rozpatrywane składniki bilansu są ściśle związane z temperaturą spalin i emisją  $\text{CO}$ , wartości tych parametrów w poszczególnych wariantach zestawiono na Rysunku 2b.



Rys. 2. Wartość straty kominowej  $S_k$  i straty niezupełnego spalania  $S_n$  (a), a także temperatura spalin i stężenie CO w spalinach (b) w zależności od rozpatrywanego wariantu doprowadzania powietrza

Fig. 2. Flue gas loss  $S_k$  and incomplete combustion loss  $S_n$  (a), as well as exhaust temperature and concentration of CO in exhaust (b) depending on the variant of air feeding

Mimo, iż temperatura spalin jak i koncentracja CO w przypadku wariantu drugiego nie są najniższe z pośród analizowanych wariantów, osiągnięto największą redukcję rozpatrywanych strat. Jest to wynik wpływu ułożenia wlotów powietrza wtórnego oraz jego strumienia na efektywność procesu spalania. Rysunek 3a prezentuje charakterystykę przepływu powietrza pierwotnego i wtórnego w komorze spalania w najkorzystniejszym wariantcie.



Rys. 3. Rozkład strumieni powietrza (a) oraz energii kinetycznej turbulencji w komorze wtórnej kotła – przekrój poprzeczny w płaszczyźnie symetrii dysz powietrza wtórnego (b) (widok z tyłu)

Fig. 3. Stream lines of air (a) and the turbulence kinetic energy in the secondary chamber of the boiler – cross sectional plane on the symmetry plane of the secondary air nozzles (b) (rear view)

Obszary o niewielkim stopniu mieszania reagentów zaznaczono okręgami. Są to rejony, gdzie decydującą rolę w spalaniu odgrywa temperatura (z uwagi na wpływ energii aktywacji na zachodzące reakcje). Poza tymi obszarami turbulentny przepływ gazów gwarantuje efektywne spalanie produktów zgazowania. Wartość energii kinetycznej turbulencji w komorze wtórnej przedstawia rysunek 3b. Wykorzystanie dysz powietrza wtórnego D2, D5 skutkuje powstaniem obszaru turbulentnego w odpowiedniej sekcji komory (centrum górnej części).

## 5. Podsumowanie

Podejście do modelowania reakcji utleniacza i produktów zgazowania biomasy zaprezentowane w niniejszym artykule pozwala na efektywną analizę zjawisk towarzyszących homogenicznemu spalaniu w fazie gazowej, zachodzących w komorze wtórnej rozpatrywanego kotła. Wyniki modelowania numerycznego umożliwiły określenie udziału straty kominowej i straty niezupełnego spalania w bilansie jednostki grzewczej. Analiza wariantowa przeprowadzona z uwzględnieniem cech konstrukcyjnych instalowanego obecnie na stanowisku doświadczalnym kotła, już na etapie przygotowania urządzenia do rozruchu dostarczyła informacji w zakresie wpływu charakterystyki stopniowania powietrza na sprawność urządzenia i poziom emisji tlenku węgla. W celu rozszerzenia modelu należy w pierwszej kolejności rozważyć transport i spalanie w komorze wtórnej cząstek stałych, co zostanie zrealizowane poprzez wykorzystanie modelu DPM (ang. Discrete Phase Model).

*Badania wykonane w ramach prac statutowych, AGH w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, zadanie nr 11.11.210.217 p.t. "Badanie uwarunkowań zrównoważonego rozwoju energetycznego"*

## Literatura

- [1] B. Sørensen: Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects, Academic Press, San Diego 2000.
- [2] Rosendahl, Biomass combustion science, technology and engineering, Woodhead Publishing, Cambridge 2013.
- [3] S. van Loo, J. Coppejan, The handbook of biomass combustion and co-firing, EARTHSCAN, London 2008.
- [4] G.M. Joselin Herbert, A. Unni Krishnan, Quantifying environmental performance of biomass energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, 2016, pp. 292-308.
- [5] L. Chaoqun, T. Jiyuan, Y. Guan-Heng, Computational Fluid Dynamics. A practical Approach, Butterworth-Heinemann, Oxford 2013.
- [6] Z. Jaworski, Numeryczna Mechanika Płynów w Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.
- [7] P. Basu, Biomass gasification and pyrolysis practical design, Academic Press, Boston 2013.
- [8] T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy, R.H. Williams, Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity, Island Press, Waszyngton 1993.
- [9] S. Kruczek, Kotły: Konstrukcje i obliczenia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
- [10] Q. Xue, T. J. Heindel, R. O. Fox, A CFD model for biomass fast pyrolysis in fluidized-bed reactors, Chemical Engineering Science, vo.66, 2011, pp. 2440-2452.
- [11] J. Blondeau, H. Jeanmart, Biomass pyrolysis in pulverized-fuel boilers: Derivation of apparent kinetic parameters for inclusion in CFD codes, Proceedings of the Combustion Institute, vol.33, 2011, pp. 1787-1794.

- [12] M.A. Gómez, J. Porteiro, D. Patiño, J.L. Miguez, Fast-solving thermally thick model of biomass particles embedded in a CFD code for the simulation of fixed bed burners, *Energy Conversion and Management*, vol. 105, 2015, pp. 30-44.
- [13] R. Baczyński, R. Weber, A. Szlęk, Innovative design solution for small-scale domestic boilers: Combustion improvements using a CFD-based mathematical model, *Journal of the Energy Institute*, vol.88, 2015, pp. 53-63.
- [14] J. Chaney, H. Liu, L. Li, An overview of CFD modelling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from simplified approach.
- [15] J. Collazo, J. Porteiro, J.L. Miguez, E. Granada, M.A. Gómez, Numerical Simulation of a small-scale biomass boiler, *Energy Conversion and Management*, vol. 64, 2012, pp. 87-96.
- [16] M. Miltner, A. Makaruk, M. Harasek, A. Friedl, Computational fluid dynamic simulation of a solid biomass combustor: modelling approaches, *Clean Technologies in Environmental Policy*, vol. 10, 2008, pp. 165-174.
- [17] Pliki pomocy ANSYS Workbench 15.

## **APPLICATION OF THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN VARIANT ANALYSIS OF HOMOGENEOUS COMBUSTION OF PRODUCTS OF BIOMASS GASIFICATION**

### **S u m m a r y**

Due to necessity of diversification of energy sources, at the end of the last century manufacturers paid attention to technologies based on renewable energy sources, which have not been fully developed. Significant popularity has been gained by plant-based biomass, including wastes from agricultural production as well as energy crops. Modern approach assumes intensification biomass usage in distributed heat production. In rural areas, which are characterized by high availability of solid biofuels, application of batch biomass - fired boilers gives significant economical profits. Moreover, such units are environmental friendly, although combustion has to be carried out using appropriate air feeding system as well as according to dedicated control algorithm. Studies in range of optimization of operation of small scale biomass - fired heating units are conducted on Faculty of Energy and Fuels in AGH University of Science and Technology in Krakow. The paper presents the CFD numerical analysis of the 100 kW straw - fired batch boiler. Construction of the heating unit has been designed based on results of the studies carried out using standard design of the batch boiler. Numerical model has been developed based on the ANSYS Workbench 15 software.. Computations have been performed by ANSYS Fluent solver.

**Keywords:** combustion, biomass, boilers, modeling, CFD

*Przesłano do redakcji: 18.07.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Krzysztof ŚLEDZIEWSKI<sup>1</sup>

## FATIGUE ASSESSMENT OF BRIDGE STRUCTURES ACCORDING TO EUROCODES

Fatigue is one of the main causes of damage in many structures. The process of fatigue damage is rather complicated and the design of structures with reference to fatigue requires a good knowledge in several fields including structural analysis, material mechanics and modeling of loads and load effects on structures. Therefore standards and recommendations related to fatigue design and analysis are often needed to assist the structural engineer in his design work. This applies both to the design of new bridges and the analysis of the remaining service life of existing bridges. General rules for determining all effects on bridges are specified in EN 1990 and Appendix A2. Verification if there is no structural damage due to fatigue should be performed in accordance with the scheme of EN, include the scope of the Ultimate Limit Stage (ULS) verifications. For the reason, that fatigue failure does not occur as a result of the load of a fixed maximum value but as a result of repetition of imposing load on an average level of internal forces, the effect of fatigue depends strongly on the properties of construction materials – steel and concrete. Thus, the effect, in the form of fatigue may be quite different in the case of steel bridges, concrete bridges or even a composite steel-concrete bridges. Therefore, the rules for determining the fatigue load are not specified in the overall standard, but are moved to detailed design standards: EN 1992 to EN 1999. Because of the high complexity of the fatigue verification, in the work the general fatigue calculation rules are presented.

**Keywords:** damage, standards, design, verification, bridges

### 1. Introduction

The key issue for the assessment and forecasting of bridge endurance is the so-called bridge fatigue. The general rules for determining actions on bridges are specified in EN 1990: Basis of structural design and Appendix A1 [1]. The verification whether a structure will fail due to fatigue in accordance with EN standards falls within the scope of the ultimate limit strengths (ULT). In general, the load combinations that should be taken into account when verifying the ultimate limit state are provided by EN 1990, with the exception of load combinations that should be taken into account during the calculation of fatigue (FAT). Be-

---

<sup>1</sup> Krzysztof Śledziwski, Lublin University of Technology, Department of Roads and Bridges, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin; tel. 815384379; k.sledziwski@pollub.pl

cause a fatigue failure does not occur as a result of an action of the load with a specified maximum value but as a result of the repeatability of a load added to some average level of internal forces, the effect of a fatigue failure depends largely on the properties of the construction materials used to build the structure. At the same load spectrum, the form of the fatigue failure may be quite different for concrete, steel and composite bridges. Therefore, the rules for determining fatigue loads have not been specified in the general EN 1990 standard but in the specific design standards: from EN 1992 to EN 1999.

All the standards for calculating the fatigue resistance of bridges adopt the Palmgren-Miner damage summation rule as the basis [2], [3]. This method requires the determination of a fatigue action on the basis of the measurements of the values and structure of the loading (the determination of the so-called load spectrum). In the absence of such data, it is recommended to use the so-called equivalent stress (meaning an equivalent range of stress variations) while verifying the fatigue resistance. This range is determined using the appropriate fatigue load model provided in EN 1991-2. The application of the appropriate model depends on the type of the structure.

In steel structures according to [4], the fatigue assessment should be carried out for all parts of the bridge if the construction of details does not comply with the standard requirements for permanent structures determined on the basis of tests.

## **2. Fatigue load models**

### **2.1. Road bridges**

The load models included in fatigue calculations are provided by EN 1991-2 standard. In the case of the structures they do not apply to, it is recommended to determine the fatigue actions on the basis of measurements or equivalent studies of expected spectra of variable actions on the structure.

The fatigue load models recommended in EN 1991-2 for road bridges are based on reference influence surfaces for different types of bridge structures, i.e. simply supported and continuous bridges for span length between 3 m and 200 m [5]. These load models can be divided in two main groups depending on the required fatigue life. The first group is used to verify infinite fatigue life. This group contains of FLM 1 and FLM 2. The second group of the fatigue load models is aimed for performing fatigue assessing for given fatigue design life using the damage accumulation method based on Palmgren-Miner rule or the damage equivalent concept, also called simplified  $\lambda$ -coefficient method. In this group, FLM 3 is applied when performing the damage equivalent concept and FLM 4 when performing the cumulative damage concept. The grouping of the fatigue load models for road bridges are compiled in Fig. 1 below.



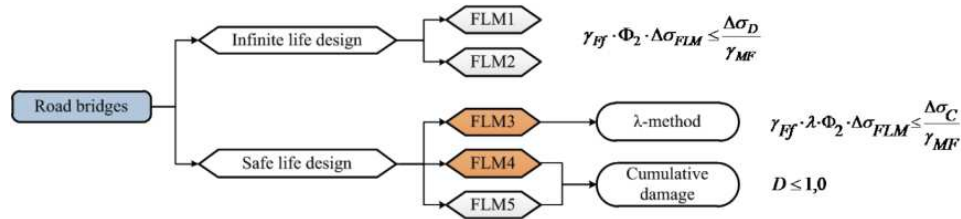


Fig. 1. Fatigue load models for road bridges, acc. to [6]

Rys. 1. Modele obciążeń zmęczeniowych, wg [6]

FLM 1 (similar to LM1) takes the form of the characteristic Load Model 1 with the axis load values equal to  $0.7 \cdot Q_{ik}$  and the evenly distributed load values equal to  $0.3 \cdot q_{ik}$  and  $0.3 \cdot q_{rk}$  (unless specified otherwise).

FLM 2 (a set of “frequent” lorries) consists of a set of idealised lorries referred to as “frequent” lorries. Each “frequent lorry” is defined with a number of axles and their spacing, the frequent axle load, the wheel contact area and the cross-wise distance between the wheels.

FLM 3 (single vehicle model) consists of four axles, each having two identical wheels – Fig. 2. The load on each axle is equal to 120 kN and the contact area of each wheel is a square with the side of 0.40 m.

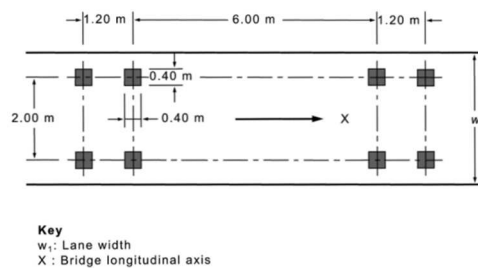


Fig. 2. Fatigue Load Model 3, acc. to [5]

Rys. 2. Model obciążenia zmęczeniowego 3, wg [5]

FLM 4 (a set of standard lorries) consists of sets of standard lorries which jointly produce effects that are equivalent to those that occur in a typical traffic on European roads. It is recommended to consider the set of lorries that is appropriate for the mixed traffic expected on the route;

FLM 5 (based on road traffic measurement data) involves the direct application of measured traffic data supplemented – if needed – with relevant statistical or projected extrapolations.

The fatigue load models 1, 2 and 3 are recommended for use in determining the maximum and minimum stress in spots susceptible to fatigue. The models 4 and 5 are used in determining the stress range spectra caused by passing lorries

with the characteristics described in these models. In addition, the models 1 and 2 are mainly used to verify the fatigue resistance of the structures for which the so-called cut-off limit was determined. In the case of such structures, we can determine the direct stress range ( $\Delta\sigma$ ), the non-exceedance of which does not result in a fatigue failure for a specific type of structure or connection, regardless of the number of variations in the value.

The models 1 and 2 are therefore applicable when verifying steel structures to determine the structure life as a result of the appearance of a fatigue damage. In the case of concrete structures, such an approach has not been defined. Consequently, they do not have a specified acceptable stress range whose non-exceedance guarantees a certain fatigue life of the structure, regardless of the number of stress cycles.

The models 3, 4 and 5 are applicable to the assessment of fatigue resistance of a structure by reference to the fatigue strength curves defined in EN-1992 to 1999. The fatigue load model 3 is used in the verification of fatigue of concrete bridges on the basis of a comparison of equivalent stresses.

The most universal fatigue model is the load model 5, which uses the actual traffic data. In practice, though, it can be used only in for the verification of the resistance of existing bridges or when we have a detailed study of the structure of traffic at the location of the planned civil engineering structure. This can be the case e.g. in a situation where we are planning to replace an existing civil structure. Additionally, the standard (EN 1991-2) recommends to define the category of the traffic on the bridge for fatigue calculations on the basis of at least:

- the number of slow traffic lanes (i.e. the lanes used mainly by lorries),
- the number  $N_{obs}$  of lorries (with a maximum overall weight greater than 100 kN), measured or estimated annually for one slow traffic lane.

The assessment of the suitability of the fatigue load models for the analysis of a variety of bridge structures depending on the method used to calculate fatigue is shown in Table 1.

Table 1. The use of fatigue load models, based on [5]

Tabela 1. Zastosowanie modeli obciążeń zmęczeniowych, na podstawie [5]

Structure type	Determination of maximum and minimum stress			Determination of stress range spectrum	
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
concrete			x	x	x
steel	x*	x*	x	x	x
composite			x	x	x
* the models used to determine whether a fatigue life can be considered unlimited with constant fatigue stress amplitude					

The internal forces required in the fatigue analysis of any bridge structure can be calculated on the basis of a global elastic analysis. For concrete struc-

tures, the verification of structure fatigue is performed separately for concrete and steel. The concrete fatigue verifications use a basic combination of non-cyclic actions (defined similarly to the frequent combination in (SLS) serviceability limit states). In steel verifications (for both reinforcing and pre-stressing steel), though, the cyclic action is considered together with the adverse basic combination, the so-called basic combination with cyclic action  $Q_{fat}$  [7]. In fatigue calculations for steel structures, stress ranges are determined based on frequent loads [8]. In turn, in composite structures, the internal forces for fatigue analysis should be determined in the same way as for concrete structures according to the load combinations specified in [7].

The fatigue resistance based on the simplified method can be calculated using the fatigue load model 3, while the verification of the reinforcement and tendons must be carried out on the basis of the multiplier load model proposed in the annexe to EN 1992-2.

## 2.2. Railway bridges

The load models for the fatigue verification of railway bridges in Eurocode can be categorised into two main groups depending on the fatigue assessment methods (Fig. 3). The first group is meant to be used for fatigue verification using the simplified  $\lambda$ -coefficient method. This group contains fatigue load model 71 (FLM 71), fatigue load model SW/0 (FLM SW/0) and fatigue load model SW/0 (FLM SW/2).



Fig. 3. Fatigue design procedure of railway bridges, acc. to [6]

Rys. 3. Procedura projektowania zmęczeniowego mostów kolejowych, wg [6]

The second group of load models is meant to be used when the fatigue verification is to be performed using the damage accumulation concept based on Palmgren-Miner rule. This group contains different traffic mixes: “normal”, “light” or “with 250 kN pressure on each axle”. If the traffic composition does not represent the actual traffic, it is recommended to use a specified alternative composition. This can be specified in the individual technical documentation.

A fatigue analysis should take into account the vertical actions of railway traffic along with dynamic effects and centrifugal forces. The lateral impacts and longitudinal traffic action may be ignored.

If the dynamic effects in the structure where the dynamic analysis is required are estimated to be excessive, some additional requirements for the assessment of bridge fatigue should be considered.

Detailed information on the trains and traffic composition as well as dynamic excesses taken into account in a railway bridge fatigue analysis are given in (normative) Annexe D to EN 1991-2. This annexe also specifies 12 types of trains for fatigue which should be used in a fatigue analysis, depending on what traffic composition is expected for a given civil structure – Fig. 4.

$$\Sigma Q = 6\,630 \text{ kN} \quad V = 200 \text{ km/h} \quad L = 262.10 \text{ m} \quad q = 25.3 \text{ kN/m'}$$

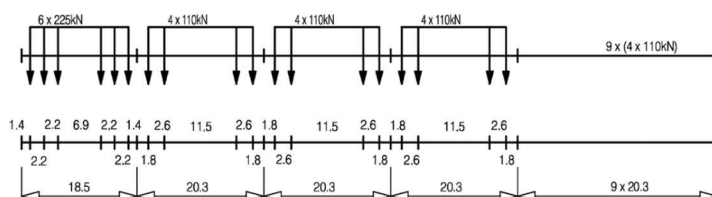


Fig. 4. An example of a train type for fatigue in normal and light traffic compositions – A type 1 railway engine pulling a passenger train, acc. to [5]

Rys. 4. Przykładowy typ pociągu zmęczeniowego w kompozycji ruchu normalnego i lekkiego – Typ 1 Lokomotywa ciągnąca pociąg pasażerski, wg [5]

We use the load model 71 while calculating the fatigue of reinforcing and pre-stressing steel for concrete bridges based on the comparison of equivalent stress. Where it is required, one should apply the model SW/0 (for continuous bridges), omitting the factor  $\alpha$ . When verifying the fatigue of pre-stressed concrete, we take into account the characteristic combination of actions with the inclusion of the model 71 (with the appropriate factor  $\alpha$ ) with a dynamic factor.

In fatigue verification using the equivalent stress method for both steel and composite bridges, we use the characteristics model 71 values, including the dynamic factor.

### 3. Fatigue design methods

Load effects generated by traffic loads on bridges are generally very complex. Not only are the stress ranges generated by these loads of variable amplitudes, but also other parameters that might affect the fatigue performance of bridge details such as the mean stress values and the sequence of loading cycles are rather stochastic.

In order to treat such complex loading situations there is a need to represent the fatigue load effects caused by the “actual” variable amplitude loading in term of equivalent constant amplitude loading. In other words, a complex loading situation should be represented as one or more equivalent constant amplitude loads, so that the latter will cause equivalent fatigue damage as the real loading history. Two steps are needed. First step is transformation of the variable amplitude loading into a representative constant amplitude loading, this is usually

done by some kind of cyclic counting method and the second step is using the new set of representative constant amplitude loading to perform the fatigue design or analysis, this is done either directly, by applying the Palmgren-Miner damage accumulation rule, or by using the equivalent stress range concept.

The rules concerned with the fatigue design of bridges in Eurocode allow for the application of any of these two methods. The simplified  $\lambda$ -method in Eurocode is an adaption of the general equivalent stress range concept corrected by various  $\lambda$ -factors, while a direct application of the Palmgren-Miner rule can alternatively be used for both railway and road bridges.

The principles of the Palmgren-Miner damage rule and the concept of equivalent stress range are however introduced below.

### 3.1. Damage Accumulation Method

Bridge dimensioning standards [4], [8], [9], as recommend the damage summation method as the basic method for calculating fatigue resistance. The most important assumptions of this method include the following [10]:

- each sinusoidal damage group is involved in the damage of the component in proportion to the  $n_i/N_i$  ratio,
- the damage is not dependent on the location of the group throughout the load spectrum,
- the total damage is equal to the sum of the damage caused by each load group separately.

In order to ensure the protection against fatigue failure, the following condition should be true:

$$D_d \leq 1, \quad (1)$$

where the measure of the component damage is the ratio between the number of purely sinusoidal load cycles ( $n$ ) to the achieved service life with the same loading parameters ( $N$ ):

$$D_d = \frac{n}{N}. \quad (2)$$

The damage  $D_d$  during the design life should be determined from:

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}}, \quad (3)$$

where:  $n_{Ei}$  – is the total number of cycles with the stress range  $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i$  (in band  $i$  in the factored spectrum),

$N_{Ri}$  – is the number of load cycles (Fig. 5) which would lead to the failure for the action of the load with the range of  $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_i$ , obtained from the factored curve  $\Delta\sigma_c/\gamma_{Mf} - N_R$ ,

$\gamma_{FF}$  – is the partial factor for fatigue actions,  
 $\gamma_M$  – is the partial factor for fatigue strengths,  
 $N_R$  – is the design life time related to the constant amplitude stress range.

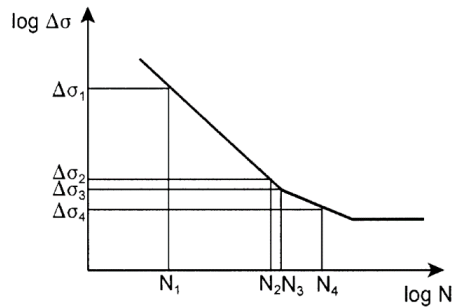


Fig. 5. Cycles to failure, acc. to [8]

Rys. 5. Liczba cykli do zniszczenia, wg [8]

In order to obtain the endurance value  $N_{Ri}$  for each band in the spectrum, the applied stress ranges are multiplied by  $\gamma_{FF}$ , and the fatigue strength values are divided by the partial factor  $\gamma_{Mf}$ . Using the method of damage summation, we must know the load spectrum of the structure. Therefore, this method is suitable for the estimation of the endurance of a structure already in use whose stress history is known. For a newly-designed structure, one should predict the method of loading the structure: the amount of the expected loading, including its structure throughout its service life.

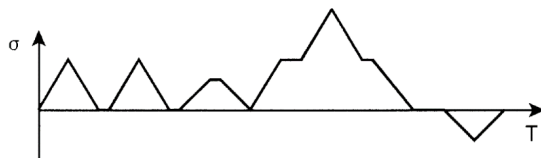


Fig. 6. Stress history at detail, acc. to [8]

Rys. 6. Historia naprężeń w elemencie, wg [8]

The stress history is determined on the basis of loading events associated with the structural detail under consideration, taking into account the type and shape of the relevant influence lines and the effects of dynamic magnification of the structural response (Fig. 6). The stress history may also be determined from measurements carried out on similar structures or from dynamic calculations of the structural response.

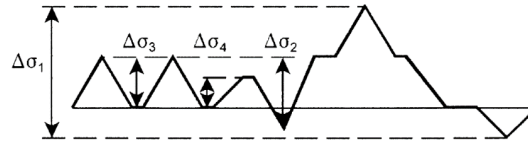


Fig. 7. Cycle counting (e.g. reservoir method), acc. to [8]

Rys. 7. Zliczanie cykli (np. metodą zbiornikową), wg [8]

Counting the cycles can be evaluated in one of two methods (Fig. 7). For short stress histories, where a single loading event recurs multiple times, it is recommended to use the “reservoir method”. Where the stress history is long and complex (e.g. obtained from tensometric measurements on the actual structure) the rainflow method is recommended.

### 3.2. Equivalent Stress Method

The difficulties in determining the load spectrum (its variations over the upcoming several years) in the design phase of the new civil structure force a fatigue resistance verification based on the equivalent stress method.

This method is based on the concept of the equivalent stress range. The equivalent constant amplitude stress range is the range of stress variations that corresponds to the same fatigue life as in the case of design spectrum based on the damage summation according to the Palmgren-Miner rule. The equivalent stress is such stress  $\sigma_c$  that will result in the failure of the component after  $N_F$  multi-level stress cycles. The equivalent stress will cause the same damage to the specimen as a complex load spectrum with the same total number of cycles.

Based on the equivalence of parameters  $D_d$ , the design stress range spectrum can be converted into any equivalent design stress range spectrum. This can be e.g. a constant amplitude stress range spectrum corresponding to the equivalent fatigue load  $Q_e$  related to the number of cycles  $n_{\max} = \sum n_i$  or the fatigue load  $Q_{E,2}$  related to the number of cycles of  $N_c=2 \cdot 10^6$ .

The fatigue resistance condition in the method of equivalent stress is described by the following relation:

$$\gamma_{FF} \cdot \Delta\sigma_E \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}, \quad (4)$$

where:  $\Delta\sigma_E$  – is the stress range adequate to the calculated component and related to a specific number of load cycles (two million cycles) calculated in accordance with the relevant structure dimensioning standards,

$\Delta\sigma_c$  – is the reference value of the fatigue strength given in the appropriate dimensioning standard.

Except for the fatigue verification for the pre-stressed concrete, all bridge dimensioning standards provide the same condition for the verification of fatigue resistance, using the equivalent stress method. One can observe some exceptions in the recommended values of partial safety factors and the recommended load models used to determine the equivalent stress. In addition, the individual variables are designated differently.

The value of the partial action factor in accordance with EN 1992-2, 1993-2 and 1994-2 should be taken as equal to  $\gamma_{Ff} = 1.0$ . However, the way of designating this factor in the above standards is different. It is designated as  $\gamma_{F, fat}$  in standard 1992-2 and as  $\gamma_{Ff}$  in standards 1993-2 and 1994-2.

In turn, in the case of a partial fatigue strength safety factor  $\gamma_{MF}$ , both its value and designation vary depending on the standard. Therefore, in standard EN 1992-2, the factor for the reinforcing or pre-stressing steel has a designation of  $\gamma_{S, fat}$ . Its value for permanent and transitional situations should be taken as equal to 1.15, or 1.0 in exceptional situations. In contrast, in the standard for steel bridges EN 1993-2, this factor has the designation of  $\gamma_{MF}$  and its recommended values depend on the failure consequences and assessment method (Table 2).

Table 2. The recommended values for the partial safety factor for fatigue strength of steel structures, based on [8]

Tabela 2. Zalecane wartości częściowego współczynnika bezpieczeństwa wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji stalowych, na podstawie [8]

Assessment method	Failure consequence	
	Low	Large
Safe line	1.15	1.35
Damage tolerant	1.00	1.15

The safe life method should provide an acceptable level of reliability that a structure will perform satisfactorily for its design life without the need for regular in-service inspection for fatigue damage. The safe life method should be applied in cases where a local formation of cracks in one part could rapidly lead to failure of a component or structure.

The damage tolerant method provides an acceptable reliability that a structure will perform satisfactorily for its design life, provided that a prescribed inspection and maintenance regime for detecting and correcting fatigue damage is implemented throughout the design life of the structure. The damage tolerant method may be applied when a load redistribution between components of structural elements can occur in the event of fatigue damage occurrence.

The process of the design of new structures usually uses the safe life method, which is the most conservative but ensures the maximum reliability of the structure. The damage tolerant method is applied only in the case the fatigue life determined for the design spectrum calculated by the safe life method is shorter than the designed service life of the structure.



In the case of composite bridges [11], the factor  $\gamma_{MF}$  takes the same values for a steel part as for steel structures, for a concrete part – as for concrete, and for composite connectors – the value of 1.0. The value of the partial safety factor for pins may also have a different value if it is provided in the national annexe. The standard does not have any information on the factor values for other types of connectors. However, by analysing the provisions for composite structures, it seems that one may take the same values for them as for connectors made of pins.

### 3.3. The $\lambda$ -Coefficient Method

The  $\lambda$ -coefficient method is a conventional simplified fatigue assessment method, which is based on comparing an equivalent stress range with the studied detail category. The basic idea with this method is that the fatigue damage caused by the stress range spectrum is associated with an equivalent stress range  $\Delta\sigma_E$  or an equivalent stress range at 2 million stress cycles  $\Delta\sigma_{E,2}$ . The method is derived originally for railway bridges, but applies also for road bridges. The purpose of this method is to convert fatigue verifications using  $\lambda$ -coefficients into a conventional fatigue resistance control, i.e. stress range check.

The conventional fatigue resistance control is on the basis of conditioning a lower or equal maximum stress range to the detail capacity stress range. The maximum stress range is the stress obtained from the fatigue load models which were originally derived to be used with this method. The fatigue verification is expressed as:

$$\lambda_{Ff} \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_{FLM} \leq \frac{\Delta\sigma_C}{\lambda_{\max}}, \quad (5)$$

where:  $\lambda$  – is the fatigue damage equivalent factor related to  $2 \cdot 10^6$  cycles,

$\Phi_2$  – is the dynamic factor,

$\Delta\sigma_{FLM}$  – is the stress range due to the fatigue load model,

$\Delta\sigma_C$  – is the reference stress range value of the fatigue strength.

The correction factor, which expresses the influence of span, annual traffic volume, design life, the multiplicity of bands, traffic type and surface roughness, can be calculated from:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \leq \lambda_{\max}, \quad (6)$$

where:  $\lambda_1$  – is the factor dependent on the type of the component (e.g. a continuous beam) and taking into account the effect of the damage caused by traffic, depending on the influence line surface length,

$\lambda_2$  – is the factor taking into account the volume of traffic; determines the influence of the annual volume and type of traffic,

$\lambda_3$  – is the factor taking into account the design service life of the bridge,

- $\lambda_4$  – is the factor of the traffic on other lanes,
- $\lambda_{\max}$  – is the maximum value of  $\lambda$  taking into account the fatigue limit, depending on the type of load, the length of span or section where the resistance is being verified.

#### 4. Fatigue assessment procedure

An example of a fatigue assessment procedure is shown for metal platforms (steel and aluminium) using the safe life method [12]. The general procedure consists of the following main stages:

- the identification of spots in the structure that are susceptible to fatigue (the so-called notches),
- the determination of loading events, i.e. a defined loading sequence applied to the structure and giving rise to a stress history, which is normally repeated a defined number of times in the life of the structure.
- the analysis of the stress history, i.e. a record or a calculation of the stress variation in spots susceptible to fatigue during a loading event,
- the determination of the stress range spectra using one of the methods of counting cycles and the determination of the design spectrum,
- the selection of the appropriate fatigue category (i.e. fatigue strength) for spots susceptible to fatigue and the determination of the design life for the individual stress ranges from the design spectrum,
- the linear cumulative damage calculation based on the Palmgren-Miner rule
- the safe life calculation and the verification if it is longer than the planned service life of the structure.

If the fatigue assessment carried out according to this procedure gives a negative result, one of the following is possible:

- conducting a fatigue re-assessment using damage tolerant method, including the control procedures enforced by this method,
- a redesign of the structure or component in order to reduce the level of stress,
- a replacement of the detail (e.g. connection type) for a solution with a higher fatigue (strength) category.

It is recommended to carry out a fatigue verification for all the structures and components that are exposed to regular load cycles. It is not necessary to carry out a fatigue assessment, though, in the case of:

- the reinforcing and pre-stressing steel in the areas where only compressive stresses from the frequent combination of actions occur,
- foundations,
- retaining walls of road and rail embankments,
- the bridge abutments as well as pillars and columns that are not rigidly connected to the span structure (with the exception of the abutment plates with holes),

- the steel railway bridge parts that are not sensitive to the wind load and are not overloaded by traffic,
- the external and unbonded tendons located in the area of the cross-section height of concrete bridges for pedestrians – unless the analysis concerns the structural components that are susceptible to the wind or pedestrian traffic,
- the bridges over waterways and underground vaulted and framing structures.

## 5. Worked example – fatigue design of a railway bridge

A verification of the fatigue life of a railway bridge is treated in this example. The verification is made with reference to one select structural details for the sake of demonstration. The simplified  $\lambda$ -method is demonstrated.

### 5.1. General description

The railway bridge is a steel bridge with a single span of 20.0 m. The cross-section of the bridge is composed of two steel girders with a common upper flange forming together an open hat-shaped profile. The cross-section dimensions are kept constant along the entire span (Fig. 8). The two steel girders are joined by U-shaped diaphragms at each  $L/4$ , which are bolted to welded vertical stiffeners.

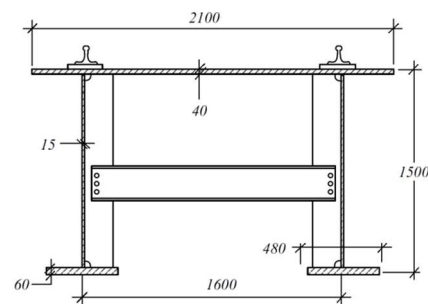


Fig. 8. Cross-section of the considered railway bridge, acc. to [6]

Rys. 8. Przekrój poprzeczny rozpatrywanego mostu kolejowego, wg [6]

Butt welds are used to connect the upper flange to the web as well as for the connection between the vertical stiffeners and the upper flanges. 5 mm fillet welds are used for the connections at the bottom side of the girders. The steel grade used for all load-carrying parts in the bridge is S355. Properties for the fatigue verification are listed in Table 3.

Table 3. Cross-section constants used in fatigue verification, based on [6]

Tabela 3. Charakterystyki geometryczne przekroju wykorzystywane do oceny zmęczeniowej, na podstawie [6]

$I$	$A$	$y_{GC}$	$W_{top}$	$W_{bot}$	$S_{bot}$
[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]
$7.531 \cdot 10^{10}$	$1.626 \cdot 10^5$	627	$-1.202 \cdot 10^8$	$8.623 \cdot 10^7$	$5.031 \cdot 10^7$

### Bridge specific traffic data

The following bridge specific data has been adopted in this example:

- design life = 120 years,
- the safe life assessment method should be used for bridges with high consequence of failure,
- partial factors for fatigue:
  - $\gamma_{FF} = 1.0$  (1993-2: 9.2),
  - $\gamma_{Mf} = 1.35$  otherwise (1993-1-9, Table 3.1),
- rail traffic with 25 t axels is used for fatigue verification (1993-2, 9.5.3),
- the traffic per year is specified to 25 million tons per track,
- carefully maintained track is assumed.

### 5.2. Fatigue verification using the simplified $\lambda$ -method

For the sake of this example, the fatigue verification is made for the connection of the vertical stiffener to the lower flange of the main girders at mid-span, i.e.  $x = 10.0$  m – Fig. 9.

The fatigue strength curve for select detail is shown in Fig. 10.

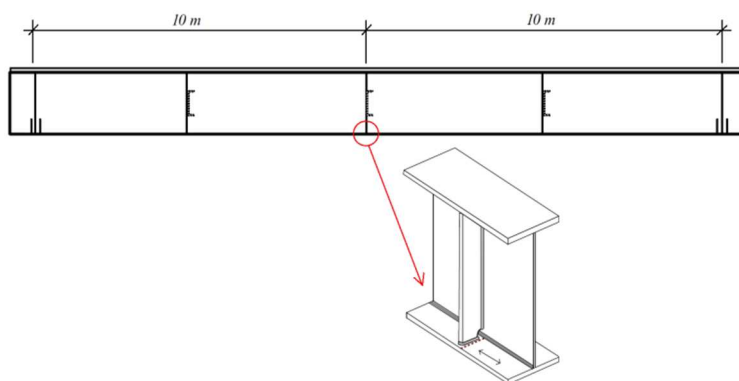


Fig. 9. The detail selected for fatigue verification, acc. to [6]

Rys. 9. Szczegół wybrany do oceny zmęczeniowej, wg [6]

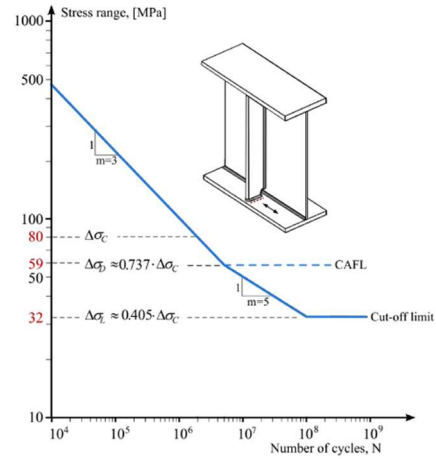


Fig. 10. Fatigue resistance data, acc. to [8]

Rys. 10. Dane odporności na zmęczenie, wg [8]

Detail Category 80 applies as given for Detail 7 in EN 1993-1-9, Table 8.4 assuming that the thickness of the vertical stiffener with the fillet welds on each side is less than 50 mm. Thus:

$$\Delta\sigma_C = 80.0\text{MPa},$$

$$\Delta\sigma_D = 59.0\text{MPa},$$

$$\Delta\sigma_L = 32.0\text{MPa}.$$

**Train load model and load effects**

The traffic load model for fatigue verification of railway bridges is LM71 (Fig. 11). Relevant load effects for fatigue verification of select detail are obtained by placing LM71 in the most unfavorable position.

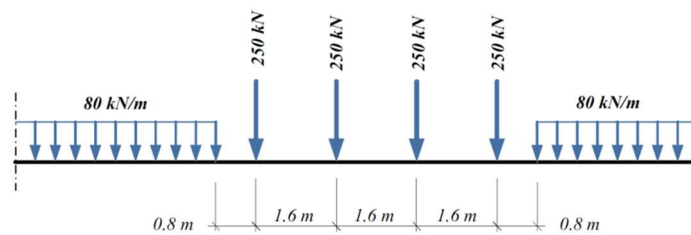


Fig. 11. Traffic load model LM71, acc. to [5]

Rys. 11. Model obciążenia ruchomego LM71, wg [5]

Normally this is easily obtained from various computer programs. In this simple example, and for the sake of demonstration, hand calculations are used to obtain the stress ranges for fatigue verification. The results – in term of sectional forces – are given in Fig. 12.

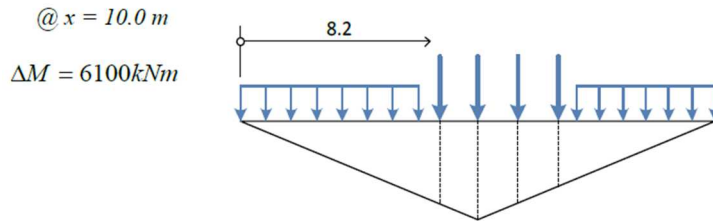


Fig. 12. Influence lines and load positions, acc. to [6]

Rys. 12. Linie wpływu i położenie obciążenia, wg [6]

In term of stresses at relevant check point, the load effects is:

$\Delta\sigma_p = 65.88 \text{ MPa}$  calculated at the top surface of the lower flange @  $x = 10 \text{ m}$ .

#### Determination of the $\lambda$ -factors

For the structural steel detail in a steel railway bridge, the  $\lambda$ -factors can be obtained according to Eq. (6). The value of  $\lambda_{\max}$  which takes into account the existence of the fatigue limit is defined in 9.5.3 (9) in EN 1993-2.

$$\lambda_{\max} = 1.4.$$

For determining  $\lambda_1$ , the critical length of the influence line needs to be determined. Section 9.5.3 (4) in EN 1993-2 should be applied. For a simply-supported bridge, the critical length of the influence line is equal to the span length, for both moment and shear action at midspan and near the supports.

For the simply-supported bridge with  $L = 20.0 \text{ m}$  and adopting “Rail traffic with 25 t axles” (EN 1993-2, 9.5.3 (3)):

$$\lambda_1 = 0.68.$$

The traffic per year was specified to 25 million tons per track, which gives (EN 1993-2, 9.5.3 (5)):

$$\lambda_2 = 1.0.$$

Adopting a design life of 120 years (EN 1993-2, 9.5.3 (6)):

$$\lambda_3 = 1.04.$$

With one track in the bridge, thus (EN 1993-2, 9.5.3 (7)):

$$\lambda_4 = 1.0.$$

Finally:

$$\lambda = 0.68 \cdot 1.0 \cdot 1.04 \cdot 1.0 = 0.707 \leq \lambda_{\max} = 1.4.$$

For railway bridges a dynamic amplification factor should be included in the fatigue verification (EN 1991-2, 6.4.5.2 and D.2). For a carefully maintained track:

$$\Phi_2 = \frac{1.44}{\sqrt{L_\phi} - 0.2} + 0.82 = 1.157 \quad \text{and} \quad 1.0 \leq \Phi_2 \leq 1.67.$$

where  $L_\phi$  is the determinant length of the bridge, which for the simply-supported bridge at hand is equal to the theoretical bridge span,  $L$  (EN 1991-2, Table 6.2).

### Fatigue verification

The fatigue verification can now be performed by comparing the equivalent stress range at 2 million cycles ( $\Delta\sigma_{E,2}$  or  $\Delta\tau_{E,2}$ ) with the fatigue strength of each detail accounting for relevant partial factor for fatigue resistance ( $\gamma_{Mf}$ ). In addition to the fatigue check in this format, a damage accumulation factor can also be derived for example from A.6 in EN 1993-1-9. The damage factor can be expressed as:

$$D_{eq} = \left( \frac{\gamma_{Mf} \cdot \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C} \right)^3. \quad (7)$$

Therefore:

$$\Delta\sigma_p = 65.88 \text{ MPa.}$$

and

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_p = 0.707 \cdot 1.157 \cdot 65.88 = 53.90 \text{ MPa.}$$

The fatigue verification reads:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} \cdot \gamma_{Mf}}{\Delta\sigma_c} = \frac{1.35 \cdot 53.90 \cdot 1.0}{80} = 0.91 \leq 1.0.$$

In term of equivalent damage, the result is:

$$D_{eq} = \left( \frac{1.0 \cdot 1.35 \cdot 53.90}{80} \right)^3 = 0.753.$$

Figure 13 presents an overview of the application of the  $\lambda$ -coefficient method with the relevant parts of Eurocode involved in the fatigue verification with this method.

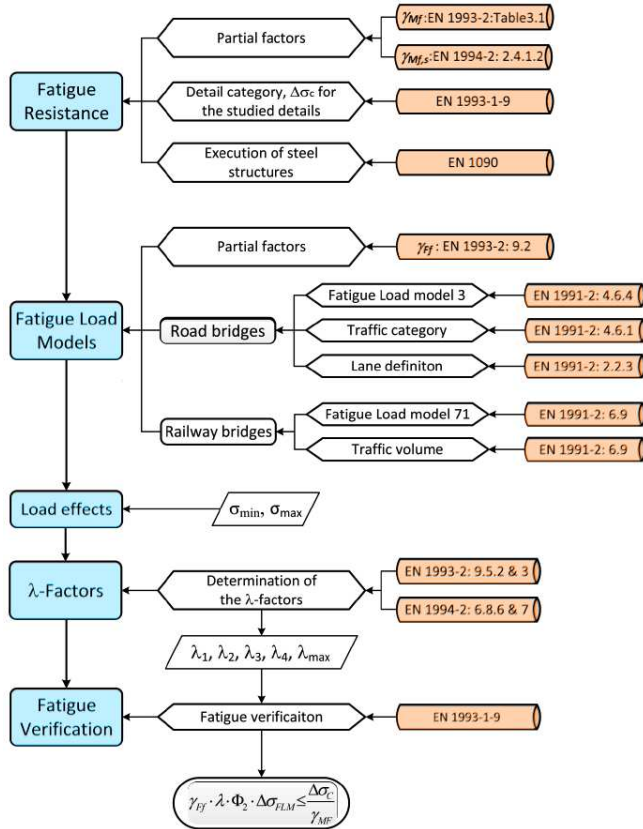


Fig. 13. The application next steps, acc. to [6]

Rys. 13. Kolejne kroki postępowania, wg [6]

## 6. Conclusions

The problem of the assessment of bridge endurance, both for road and railway bridges, has intensified significantly in recent years, and much worldwide research indicates that this trend will continue [12], [13]. Each of the types of bridges used nowadays has some sort of damage that causes a significant reduction in or limitation of its endurance, e.g. fatigue cracking. This damage causes a gradual loss of stiffness of the structural components, platforms etc. and a rapid degradation of the insulation and pavement, which leads to a reduction in the endurance of the entire civil structure. Therefore, the fatigue assessment is one of the most important design procedures, whose performance according to Euro codes is necessary both for newly designed bridges and in the assessment of the continued usability of the existing structures.



## References

- [1] EN 1990, Eurocode 0: Basis of structural design, European Committee for Standardisation, Brussels 2004.
- [2] Miner M.A.: Cumulative damage in fatigue, *Journal Applied Mechanics*, vol. 12(3), 1945, pp 159-164.
- [3] Palmgren A.: Die Lebensdauer Von Kugellagern, *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, vol. 68(14), 1924, pp 339-341.
- [4] EN 1993-2, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 2: Steel Bridges, European Committee for Standardisation, Brussels 2006.
- [5] EN 1991-2, Eurocode 1: Actions on structures, Part 2: Traffic loads on Bridges, European Committee for Standardisation, Brussels 2003.
- [6] Al-Emrani M., Aygül M.: Fatigue design of steel and composite bridges. Report 2014:10, Göteborg, Sweden 2014.
- [7] EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardisation, Brussels 2004.
- [8] EN 1993-1-9, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1–9: Fatigue, European Committee for Standardisation, Brussels 2005.
- [9] EN 1992-2, Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 2: Concrete bridges – Design and detailing rules, European Committee for Standardisation, Brussels 2005.
- [10] Czudek H., Pietraszek T.: The endurance of steel bridge structures with variable loads, WKŁ, Warszawa 1980.
- [11] EN 1994-2, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 2: General rules and rules for Bridges, European Committee for Standardisation, Brussels 2005.
- [12] Siwowski T.: Fatigue assessment of existing riveted truss bridges: case study, *Bull. Pol. Ac.: Tech.*, vol. 63(1), 2015, pp 125-133.
- [13] Biondini F., Frangopol D.M. (eds): Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability, Proc. Of the Sixth International IABMAS Conference, Stresa, Lake Maggiore, Italy, 8-12 July 2013, CRC Press.

## OCENA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ OBIEKTÓW MOSTOWYCH WEDŁUG EUROKODÓW

### Streszczenie

Zmęczenie jest jedną z głównych przyczyn uszkodzenia wielu konstrukcji. W związku z tym, procedura oceny trwałości zmęczeniowej jest jedną z najistotniejszych, w kompleksowej ocenie nośności i trwałości obiektu. Dotyczy to zarówno projektowania nowych mostów, jak i analizy pozostałego okresu eksploatacji istniejących mostów. Niezawodna ocena trwałości zmęczeniowej jest przede wszystkim decydująca przy szacowaniu pozostałej (resztkowej) przydatności eksploatacyjnej. Ogólne zasady ustalania oddziaływań działających na mosty określa norma EN 1990 wraz z Załącznikiem A1. Sprawdzenie, czy nie dojdzie do zniszczenia konstrukcji na skutek zmęczenia zgodnie z systemem norm EN, zaliczamy do zakresu stanów granicznych nośności (ULS). Z tego powodu, awarie zmęczeniowe nie występują w wyniku obciążenia o stałej wartości maksymalnej, ale w wyniku powtórzenia obciążenia na średnim poziomie sił wewnętrz-

nych. Wpływ zmęczenia zależy w dużym stopniu od właściwości użytych materiałów konstrukcyjnych – stali i betonu. Końcowy efekt zmęczenia materiału (konstrukcji), może być zupełnie inny w przypadku mostów stalowych, mostów betonowych bądź mostów zespolonych typu stal-beton. Stąd też zasady określania obciążenia zmęczeniowego nie są określone w ogólnej normie, ale są przenoszone na szczegółowe normy projektowania od EN 1992 do EN 1999.

W niniejszej pracy przedstawiono ogólne reguły oceny trwałości zmęczeniowej mostów. Ponadto dokładnie omówiono obliczanie nośności zmęczeniowej zarówno metodą kumulacji uszkodzeń jak również metodą ekwiwalentnych naprężeń a także podano tok postępowania przy ocenie zmęczenia pomostów metalowych.

**Słowa kluczowe:** zniszczenie, normy, projektowanie, sprawdzenie, mosty

*Przesłano do redakcji: 12.05.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Marek GOSZTYŁA<sup>1</sup>  
Agata MIKRUT<sup>2</sup>

## BADANIA BUDOWNICTWA LUDOWEGO NA WYBRANYCH PRZYKŁADACH HISTORYCZNYCH MIEJSCOWOŚCI ŁEMKOWSKICH

Jednym z cenniejszych przykładów budownictwa ludowego Karpat są łemkowskie chałupy. Jednobudynkowa zagroda, mieszcząca pod wspólnym dachem zarówno pomieszczenia mieszkalne jak i gospodarcze, stanowi charakterystyczny dla obszaru Łemkowszczyzny typ zabudowy. Plan funkcjonalny łemkowskich chyż ulegał modyfikacjom, rozbudowom i w zależności od regionu, wykształciły się jego lokalne odmiany. Budynki mieszkalno-gospodarcze, ze względu na rozbudowany plan funkcjonalny, osiągały znaczne długości i wysokości. Chałupy na planie wydłużonego prostokąta, kryte wysokim, spadzistym dachem w swojej niezmienionej formie można było spotkać jeszcze w połowie XX wieku. Obecnie wiele z nich zostało mocno przebudowanych i zaadaptowanych do potrzeb współczesnych użytkowników.

W pierwszej części artykułu został przedstawiony dotychczasowy stan badań. Omówiono istotne elementy łemkowskich chyż, charakteryzujące ten rodzaj ludowej architektury. Stały się one podstawą do przeprowadzenia analiz budownictwa ludowego na wybranych miejscowościach. Badania i wnioski zostały opisane w drugiej części artykułu.

**Słowa kluczowe:** Łemkowie, chyże, budynki mieszkalno-gospodarcze, zagroda jednobudynkowa, architektura drewniana, plany funkcjonalne chałup

### 1. Wprowadzenie

Z uwagi na bogaty materiał badawczy artykuł został podzielony na dwie części i będzie kontynuowany w kolejnych periodykach. W pierwszej części został omówiony dotychczasowy stan badań. Natomiast w drugiej części artykułu przedstawiono wyniki badań domów drewnianych przeprowadzone na przykładzie dwóch miejscowości: Bartne i Komańcza. Wykazano podobieństwa i różnice w zabudowie ze wschodniej Łemkowszczyzny - Komańcza i środkowej Łemkowszczyzny reprezentowanej przez Bartne. Porównano chałupy po-

---

<sup>1</sup> Marek Gosztyła, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12, tel. +4817 865 1939, gosztyla@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Agata Mikrut, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12, tel. +4817 743 2106, a.mikrut@prz.edu.pl

chodzące z końca XIX i początku XX wieku. Pod uwagę zostały wzięte wymiary chałup oraz ich układy funkcjonalne.

Granice Łemkowszczyzny, czyli terenu zamieszkiwanego przez odrębną grupę etnograficzną jaką stanowili Łemkowie, określił Roman Reinfuss. Na podstawie własnych badań terenowych wyznaczył region etniczny, którego mieszkańcy mieli poczucie odrębności kulturowej, przynależności grupowej i posługiwali się własnym językiem [10, s. 6-15]. Należy pamiętać, że „Łemko” czy „Łemkowszczyzna” to nazwy, które zaczęto używać dopiero w XX w. określając tak Rusinów i zamieszkiwane przez nich tereny Karpat. Po przesiedleniach, które nastąpiły na skutek Akcji „Wisła”, nieliczna ich część zamieszkuje rodzime tereny. Mimo rozproszenia, stanowią oni nadal grupę ludności wyróżniającą się swoją kulturą, sztuką i językiem [10, s. 8].

Znaczącym osiągnięciem ludowej architektury Łemków są drewniane cerkwie, jednak nie mniejszą wartość stanowią łemkowskie zagrody wiejskie, którymi przeważnie były budynki mieszkalno-gospodarcze tzw. chyże. Typologia budownictwa ludowego wsi łemkowskich posiada charakterystyczne cechy. Porównanie obiektów budownictwa wiejskiego z tego regionu pod względem konstrukcji, układu pomieszczeń, używanych materiałów, sposobów zdobnictwa pozwala na wskazanie typowych dla tego rodzaju zabudowy cech.

Jeszcze w drugiej połowie XX w. można było zobaczyć wiele łemkowskich domów zachowanych w dobrym stanie. Obecnie jest ich coraz mniej, niektóre przetrwały, ale ze zmienionymi elementami (rys. 1), na przykład gontowe pokrycia dachowe zostały zastąpione dachówkami ceramicznymi lub współczesnymi blachami. Te chaty, które ze względu na zły stan techniczny nie nadają się do użytkowania, niszczeją i popadają w ruinę.



Rys. 1. Chata łemkowska ze zmienionym pokryciem dachowym, Bartne nr 18, fot. A. Mikrut, 06. 2015

Fig. 1. Lemko Longhouse with the changed roofing, Bartne no. 18, photo. A. Mikrut, 06. 2015

## 2. Opis łemkowskiego budownictwa ludowego

### 2.1. Osadnictwo łemkowskie

Tereny łemkowszczyzny obejmowały Beskid Niski, część Beskidu Sądeckiego i zachodni skrawek Bieszczadów. Proces zakładania wsi i zasiedlania łemkowszczyzny trwał od XIV do XVII w. Ze względu na górski region, przeważały wsie o układzie łańcuchówki położone w dolinach potoków. Bywały też wsie o układzie niwowym regularnym. Najczęściej spotykany był ulicowy kształt wsi, czasem posiadający plac w centrum (np. Ujście Ruskie i Jaworki) [9, s. 20].

W zagrodzie znajdowała się stodoła, zazwyczaj połączona ze stajnią oraz osobne obiekty takie jak: chlew, szopa, spichlerz, czasem studnia. Spichlerze budowano zwłaszcza przy wsiach przygranicznych. Posiadały one cechy budownictwa słowackiego i od języka słowackiego nazywano je „sypańcami”. Spichlerze były niewielkimi, podpiwniczonymi budynkami drewnianymi. Posiadały jedno wnętrze. Ściany zrębowe budowano z półokrągłaków, sklepienie tzw. beczkowe lub kolebkowe, o konstrukcji wieńcowej układano w formie łuku. Spichlerze kryto dwuspadowymi dachami z gontu. Ochronę przed ogniem stanowiła warstwa gliny, którą obkładano ściany i sklepienie. Drzwi wykonywano z grubych desek, do których gęsto wbijano, przechodzące na wylot, ćwieki z dużymi główkami. Masywne drzwi miały chronić przed włamaniem [9, s. 20].

Zagrody i budynki na łemkowszczyźnie różniły się między jej zachodnią a wschodnią częścią. Zagroda jednobudynkowa, gdzie pod jednym dachem mieściły się pomieszczenia gospodarcze i mieszkalne, dominowała na wschodniej łemkowszczyźnie. W tym samym budynku zazwyczaj mieściły się: stajnia, boisko, wozownia, a w części mieszkalnej izba, sień oraz komora. Były to duże obiekty, o szerokości 6-7 m i długości dochodzącej nawet do 25 m.

O lokalizacji domów decydował kierunek południowy, do którego najczęściej ustawiano front budynku. We wsiach środkowo- i wschodniołemkowskich domy kierowano frontem na wschód, a ścianą szczytową na południe. Taki sposób sytuowania obiektów mieszkalnych wynikał z warunków klimatycznych regionu, nasłonecznienia oraz silnych wiatrów południowych wiejących głównie z Przełęczy Dukielskiej. Zapewniało to najlepsze oświetlenie pomieszczeń w ciągu dnia [3, 4].

Układ pomieszczeń był różnie modyfikowany, ze względu na możliwości ekonomiczne właścicieli. W uboższych chyżach zamiast osobnej sieni znajdowało się boisko z szerokimi wrotami pozwalającymi na wjazd wozu. Bezpośrednio z boiska przechodziło się do izby. Domy z boiskiem odgradzającym część mieszkalną od gospodarczej należą do najstarszych typów chyży. Tego typu zabudowa występowała licznie jeszcze w okresie międzywojennym między innymi w Rychwałdzie (Owczarach), Rozdzielu, Bednarce i Pielgrzymce [7, s. 97].

Łemkowie zamieszkujący środkową i wschodnią Łemkowszczyznę budowali zagrody określane jako jednobudynkowe, mimo iż wiele gospodarstw miało również osobne, podpiwniczone spichlerze. Rolę stodoły spełniał strych, gdzie znajdowały się snopy zboża oraz słoma zrzucaane w miarę potrzeby na boisko. Boisko pełniło rolę „dużej sieni” [6, s.130].

Stodoła i stajnia połączona jednym dachem to obiekt charakterystyczny dla Łemkowszczyzny sądeckiej. Łemkowie zamieszkujący lewą stronę Ropy a także Pogórze, rzadziej wznosili takie budynki.

U Łemków zamieszkujących okolice Ujścia Gorlickiego wykształcił się typ domów ze stajnią przed którą znajdował się korytarz, łączący stajnię i boisko z mieszkaniem. Korytarzyk znajdował się wewnątrz chyży co miało znaczenie szczególnie zimą kiedy można było przemieszczać się pomiędzy pomieszczeniami bez potrzeby wychodzenia z budynku [1].

W niektórych chyżach, część boiska usytuowanego w centralnej części budynku oddzielano ścianką z desek, otrzymując w ten sposób osobną sień. Najczęściej jednak sień była związana w sposób konstrukcyjny z częścią mieszkalną [5, s. 19].

## 2.2. Plany łemkowskich domów

Domy Łemków, chyże były rozplanowywane na planie jednoraktowym, półtoraktowym bądź dwuraktowym. Plany chałup łemkowskich były często bardzo rozbudowane, posiadały liczne pomieszczenia gospodarcze [8].

Jednoraktowe domy były dość rzadko spotykane, budowano je zazwyczaj na pograniczu z Pogórzem i w okolicach Krynicy. Typ półtoraktowy, gdzie izba i komora znajdowały się po jednej stronie sieni, występował częściej. Dwuraktowy typ chyży występował w różnych układach pomieszczeń, najczęściej po jednej stronie sieni była izba z alkierzem a po drugiej komora i chyżka [7, s. 100].

W jednoraktowym układzie wnętrza, w centralnej części znajdowała się przechodnia sień a po obu jej stronach izby, z których jedna zwana „piekarnią” posiadała piec do gotowania, natomiast druga, tzw. „świtołka” była izbą zimną, nieogrzewaną. W większych budynkach izby znajdowały się po tej samej stronie boiska pełniącego rolę sieni. Izby znajdowały się w układzie amfiladowym, a po przeciwnej stronie sieni miejsce izby zimnej zajmowały pomieszczenia gospodarcze takie jak: stajnia lub komora. Izby ogrzewano wtedy piecem umiejscowionym w ścianie, która je dzieliła. Ubogie chyże miały tylko jedną izbę oraz obszerną sień, wykorzystywaną jako pomieszczenie do młócenia zboża lub do przechowywania zwierząt [9, s. 10].

Domy z półtoraktem gospodarczym spotykane były na wschodniej Łemkowszczyźnie. Stajnia i komora zwana „kumnatą” znajdowały się w układzie równoległym po jednej stronie sieni, natomiast po jej drugiej stronie była izba z piecem [9, s. 11].

Chyże dwutraktowe pojawiały się nielicznie, w nowszym budownictwie. Z centralnie usytuowanej sieni można było przejść do izby z małą switołką, znajdujących się w układzie amfiladowym bądź do drugiej izby z kumnatą, po przeciwnej stronie. Zagrody jednobudynkowe, typowe dla środkowej i wschodniej Łemkowszczyzny, pod koniec okresu międzywojennego zaczęły przenikać do jej zachodniej części [9].

### 2.3. Chyże od strony konstrukcyjnej

Budynki drewniane wznoszono na poukładanych kamieniach, dębowych pniakach lub wykonywano podmurówkę z dostępnych kamieni (polnych lub rzecznych). Zapewniało to ochronę obiektu przed wilgocią oraz wyrównywało poziom budynku.

Na Pogórze, jako budulec używano drewna jodłowego, pierwotnie okrągłaków. Na początku XIX w. chałupy budowano z płazów obrabianych z połówek. W najstarszych budynkach, węgły wiązano na obłap, tzw. „starowickie uha”. Wyparły je dopiero wiązania na rybi ogon, które zaczęto wykonywać na przełomie XIX i XX w [9, s. 12].

Głównymi cechami charakterystycznymi dla południowołemkowskiego domu były: zrębowa konstrukcja z twardego drewna oraz wysoka słomiana strzecha [2].

Podczas wnoszenia budynku, bale przycinano odpowiednio do otworów okiennych. Wymiary okien początkowo były bardzo małe i powiększały się w miarę rozwoju budownictwa drewnianego [7, s. 100]. Niewielkie okna w chyzach, tzw. wyhlady, posiadały cztery lub sześć szybek osadzonych w drewnianej ramie, która była nieruchomo zamocowana w futrynie. Większe okna uzyskiwano montując obok siebie dwa małe okna rozdzielone pionowym słupkiem. Powstałe w ten sposób okna bliźniacze nazywano je „wełykami wyhlad”.

Drzwi miały różne wielkości. Prostokątne otwory wejściowe zamykano taflą zbitą z grubych desek i osadzoną albo na kołowrocie (w starszych chyzach) albo na żelaznych zawiasach (w młodszych chyzach). W starszych domach, zamożnych Łemków, ościeże drzwi było zamknięte górą półkoliście, z profilowanymi i kołkowanymi zastrzałami w narożnikach. Od frontu, taflę drzwi, układano specjalnie zrobionymi, wąskimi klepkami, układającymi się we wzór na jodełkę bądź rąb [9, s. 12].

Na całej Łemkowszczyźnie chyże kryto dachami czterospadowymi o konstrukcji krokwiowo-płatwiowej. Dach był wysoki i spadzisty ze względu na duże opady śniegu i konieczność pomieszczenia pod nim znacznej ilości siana. Wysokość dachu stanowiła około 2/3 wysokości całej chaty [9, s. 12]. Dachy czterospadowe przeważały do końca XIX w. Pierwotnie pokrycie stanowiła słoma, zabezpieczana gontami jedynie na kalenicy i okapach. Stosowanie gontów na chyzach stało się powszechne dopiero w drugiej połowie XIX wieku, kiedy to wiele gmin wykupiło lasy będące własnością dworów i przez to zwiększył się

dostęp do drewna. Rozpoczęła się wówczas produkcja gontów na szeroką skalę. W XIX w., głównie między Popradem a Białą rozpowszechniło się krycie dachów gontem co spowodowało zmianę na dachy dwuspadowe z okapem bocznym. W budynkach o dwuspadowych dachach, pionowe szczyty także objano gontem [7, s. 100].

Zdarzało się, że na szczytowej połaci dachu, w rogu przy kalenicy umieszczano gontowy daszek w kształcie połowy niskiego ostrosłupa o szerokiej podstawie, który pierwotnie miał chronić otwór dymnika [7, s. 100].

Dookoła budynku znajdował się szeroki okap, który wspierały wystające belki zrębu. Od północnej i zachodniej strony, równo z okapem chyży stawiano dodatkowe lekkie ścianki, wykonane z pionowych desek. Pozwalało to na otrzymanie dodatkowe przestrzeni gospodarczej, w której przechowywano słomę i siano, składowano drewno na opał lub przechowywano narzędzia rolnicze. Tą część budynku, nazywana „zahatą” bądź „pryhata”, pełniła dodatkowo funkcję ochronną. Osłaniała ściany budynku przed silnym wiatrem, deszczem lub śniegiem, ograniczając w ten sposób straty ciepła. Zagatami z gontów lub desek ochraniało szczególnie mieszkalne partie domu. Konstrukcja dachu miała na celu nie tylko ochronę przed opadami ale również ochronę przed wiatrem, co poprawiało termiczne właściwości budynku [7, s. 97-98].

#### **2.4. Elementy dekoracyjne chyż**

Domy łemkowskie nie miały bogatej dekoracji stolarskiej, zdobiono je jedynie poprzez malowanie ścian zewnętrznych. Dekoracje malarskie były różne, w zależności od regionu. Najbogaciej zdobiono chyże na wschodniej Łemkowszczyźnie, czego przykładem są domy w Komańczy. Do malowania używano palonej glinki. Zrąb malowano na czerwono lub brązowo, szpary pomiędzy belkami bielono, obramienia okien podkreślano na zielono lub niebiesko a okna i drzwi malowano na żółto [7, s. 98]. Charakterystycznym elementem dekoracyjnym łemkowskich domów były malowane wapnem wokół okien i drzwi opaski o motywach roślinnych lub geometrycznych. Takie malarstwo rozwijało się we wschodniej Łemkowszczyźnie do końca II wojny Światowej. Malarskie przedstawienia nie były konkretnymi rysunkami, a symbolami przypominającymi znaki własnościowe bądź apotropaiczne symbole [3, s. 104]. W powiatach jasielskim i krośnieńskim, środkowej łemkowszczyźnie, do malowania ścian zewnętrznych używano czarnej ropy, a szpary pomiędzy belkami bielono wapnem. Na zachodniej Łemkowszczyźnie dekoracja domów nie była tak popularna. Jedynie w niektórych wsiach zrąb malowano białymi, pionowymi pasami bądź kropkami [7, s. 98]. Niekiedy białe, koliste lub prostokątne „kropy” biegly w poziomych lub pionowych pasach po całej powierzchni zrębu [9, s. 13], (rys. 2.).





Rys. 2. Popadająca w ruinę chałupa nr. 1 z miejscowości Bartne, fot. A. Mikrut, 06.2015

Fig. 2. Lemko Longhouse no. 1 in Bartne falling into the ruin, photo. A. Mikrut, 06. 2015

### 3. Podsumowanie

Budownictwo łemkowskie cechuje mocno rozbudowana część gospodarcza, znajdująca się wraz z częścią mieszkalną pod jednym dachem. Ewolucyjny rozwój układu pomieszczeń budynków mieszkalnych miał wpływ na ich bryłę a także spowodował zróżnicowanie zagrod. Zmiana materiału kryjącego połacie dachu, spowodowała zmianę jego kształtu, co w konsekwencji zmieniło bryłę pierwotnej chyży. Dekoracyjne elementy malarskie, stosowane na elewacjach chat, stały się znakiem charakterystycznym łemkowskich domów. Budownictwo wiejskie Łemków miało wpływ na architekturę ludową Bojków, którzy zapożyczyli od nich liczne cechy. Świadczy to o szerokim oddziaływaniu kultury i sztuki Łemków na innych mieszkańców tej części Karpat.

#### Literatura:

- [1] Czajkowski J., *Budownictwo Ludowe Podkarpacia*, Krajowa Agencja Wydawnicza, Sanok 1997.
- [2] Czajkowski J., *Łemkowie w historii i kulturze Karpat. Cz. I*, Muzeum Budownictwa Ludowego, Sanok 1995.
- [3] Czajkowski J., *Zagroda i dom w Beskidzie Niskim, Bieszczadach i na Pogórzu*, [w:] *Łemkowie-Kultura-Sztuka-Język*, Wyd. PTTK KRAJ, Sanok 1983.

- [3] Czajkowski J., *Studia nad Łemkowszczyzną*, Muzeum Budownictwa Ludowego, Sanok 1999.
- [4] Czajkowski J., *Materiały Muzeum Budownictwa Ludowego w Sanoku*, Sanok 1966, nr 4.
- [5] Gajur J., *Od Magury po Oslawę. Podróż sentymentalna po Łemkowszczyźnie*, Wyd. Arete II, Krosno 2007.
- [6] Karczmarszewski A., *Świat Łemków. Etnograficzna podróż po Łemkowszczyźnie.*, Wyd. Libra, Rzeszów 2014.
- [7] Lew S., *Budownictwo ludowe dorzecza Sanu w XIX i XX wieku*, Wyd. Mitel, Rzeszów 2003.
- [8] Reinfuss R. *Materiały Muzeum Budownictwa Ludowego w Sanoku*, Sanok 1998, nr 34.
- [9] Reinfuss R. *Śladami Łemków*, Wydawnictwo PTTK „Kraj”, Warszawa 1990.
- [10] Smockiewicz L. *Materiały Muzeum Budownictwa Ludowego w Sanoku*, Sanok 1968, nr 7.

## RESEARCH OF FOLK CONSTRUCTION ON CHOSEN EXAMPLES OF HISTORICAL LEMKOS' HOMELAND

### Summary

One of the most discernible examples of the Carpathian folk architecture is Lemkos' cottages. Single building farmhouse, which under the same roof contains both living as well as utility rooms, is characteristic building type for Lemkos' homeland. The functional plan of the so-called 'chyże' was revised, undergoing significant change, and depending on the region, developing its local variety. Residential and commercial buildings, due to the extensive functional plan, were of a significant length and height. Cottages on the elongated rectangle plan, which covered steeply slanting roof in its unchanged form, were still to be seen in the mid-20th century. Nowadays many of them have been extensively rebuilt and adapted to the needs of today's users.

In the first part of the article the current state of research has been presented. The essential elements of the Lemkos 'chyże', a typical feature of this kind of folk architecture, have been discussed. They have become the basis for carrying out analyses of folk buildings in selected villages. Research and conclusion data have been described in the second part of the article.

**Keywords:** Lemkos, 'chyże', single building, residential buildings, wooden architecture, functional plans cottages

*Przesłano do redakcji: 2.10.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Natalia KORCZ<sup>1</sup>

## MODELE NUMERYCZNE UWZGLĘDNIAJĄCE TARCZOWĄ PRACĘ POKRYCIA DACHOWEGO Z BLACH TRAPEZOWYCH

W artykule porównano wybrane sposoby uwzględniania w modelowaniu numerycznym tarczowej pracy pokrycia dachowego z blachy trapezowej, możliwe do zrealizowania w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015, w celu oceny słuszności stosowania ich do obliczeń konstrukcji nośnej współpracującej z poszyciem z blachy trapezowej. Analizy przeprowadzono dla pojedynczej przepony. Za pomocą powłokowych elementów skończonych zbudowano dwa typy modeli blachy trapezowej. Uwzględniono podatność połączeń występujących w konstrukcji, wykorzystując pomocnicze belkowe elementy skończone. Wartości podatności na ścinanie paneli uzyskane numerycznie odniesiono do wyników otrzymanych na podstawie znanych procedur analitycznych. Miarą trafności modelu poszycia był poziom zgodności ww. wartości podatności na ścinanie. Zgodnie z tym kryterium wskazano model, który poprawniej odwierciedla współpracę pokrycia z blachy trapezowej z konstrukcją nośną.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje stalowe, hala stalowa, przepona, projektowanie współpracy poszycia z konstrukcją nośną, powłoka ortotropowa

### 1. Wprowadzenie

Zastosowanie blachy trapezowej jako elementu poszycia budynku ma wpływ na sztywność szkieletu nośnego i przestrzenny charakter jego pracy, a co za tym idzie na przemieszczenia poszczególnych elementów i występujące w nich siły wewnętrzne. Mimo, że idea współpracy obudowy z konstrukcją nośną (AmE „diaphragm design”, BrE „stressed skin design”) jest od wielu lat powszechnie znana, w tradycyjnym projektowaniu pracę tarczową blachy trapezowej najczęściej pomija się, biorąc pod uwagę jedynie stężającą rolę blachy wobec płatwi. Wydaje się, że największą przeszkodą hamującą wzrost popularności uwzględniania w praktyce projektowej zjawiska pracy tarczowej poszycia z blachy trapezowej jest brak wystarczająco sprawdzonych, uniwersalnych i prostych do zastosowania przez projektanta rozwiązań tego zagadnienia. Nadal bowiem

---

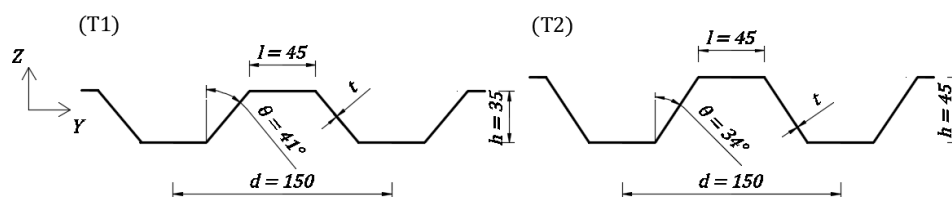
<sup>1</sup> Natalia Korcz, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; tel. 507-297-658; natkorc1@pg.edu.pl

poszukiwane (i rozwijane) są możliwie efektywne metody rozpatrywania tarczowej sztywności pokrycia w inżynierskich procedurach projektowych [1, 2, 3, 5, 6, 7]. W obliczu rozwoju narzędzi wspomagających projektanta podczas analizy statycznej (i dynamicznej) konstrukcji, uwzględnianie w przestrzennych analizach numerycznych współpracy poszycia z konstrukcją nośną wydaje się być podejściem coraz bardziej ekonomicznie uzasadnionym.

Celem artykułu była ocena słuszność stosowania wybranych sposobów uwzględniania w modelowaniu numerycznym tarczowej pracy pokrycia dachowego z blachy trapezowej. Jako kryterium oceny modeli przyjęto zbieżność otrzymanych numerycznie wartości podatności na ścinanie paneli z rezultatami analitycznymi. Analizę zawężono do dwóch narzędzi dostępnych w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015 (ARSA), a więc również w większości innych inżynierskich programów do modelowania konstrukcji MES, w których dostępne są powłokowe elementy skończone.

## 2. Analizowany układ konstrukcyjny

W celu porównania różnych modeli obliczeniowych, do analiz przyjęto układ pojedynczej przepony o konstrukcji z elementów giętych na zimno, jak na rys. 3. Na dwóch pasach górnych dźwigarów kratowych z kształtownika o przekroju kapeluszowym (główne wymiary 114 x 121 mm, grubość ścianki 6 mm) oparto pięć płatwi Z-owych o wysokości 250 mm, szerokości stopki 60 mm i zróżnicowanej grubości ścianki (2 mm albo 4 mm). Z kolei na płatwiach ułożono blachę trapezową w dwóch wariantach wysokości  $h$ : 35 mm (T1) i 45 mm (T2) oraz o zróżnicowanej grubości ścianki  $t$  (0,7 mm albo 0,6 mm). Geometrię dwóch wariantów blachy pokazano na rys. 1. Rozpatrywano oparcie poszycia na dwóch (2K) i czterech krawędziach (4K). W przypadkach (4K), uwzględniono elementy pośrednie, czyli podpórki brzegowe umożliwiające połączenie blachy z dźwigarem (rys. 3).



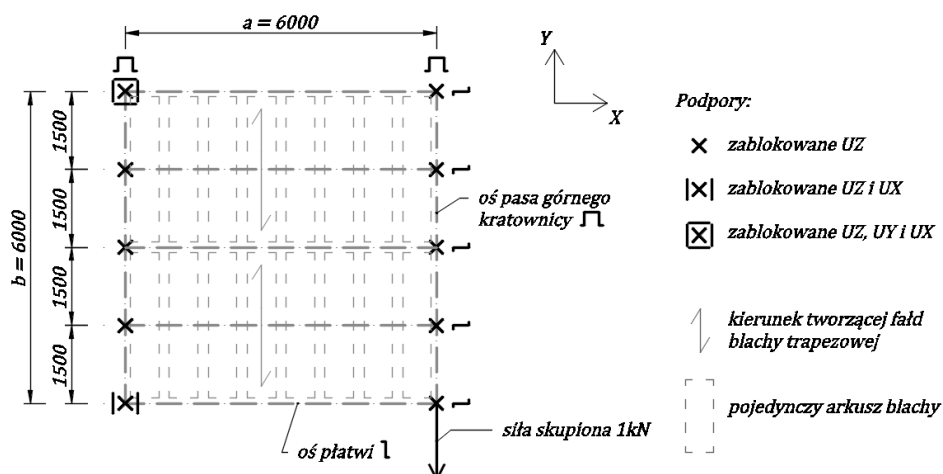
Rys. 1. Blacha trapezowa (T1) i (T2) – geometria

Fig. 1. Trapezoidal sheeting profiles (T1) and (T2) – geometry

Pojedynczy panel, stanowiący przedmiot analiz, składał się również z łączników elementów konstrukcji. Jak pokazano na rys. 3, wyróżnia się [2]:

- łączniki główne - łączące blachę trapezową z płatwiami,

- łączniki uszczelniające - łączące kolejne arkusze blachy ze sobą (w analizowanych modelach pominięte),
- łączniki pośrednie - łączące blachę trapezową z elementem pośrednim (4K).



Rys. 2. Analizowany układ konstrukcyjny – schemat

Fig. 2. Static scheme of the diaphragm used in the analyses

Ideowy szkic konstrukcji wraz z podstawowymi wymiarami osiowymi, schematem podpór i obciążenia, przedstawiono na rys. 2. Przyjęto wymiary gabarytowe przepony (w osiach) 6 m x 6 m, rozstaw płatwi 1,5 m. Założono, że obciążenie ścinające w postaci siły skupionej o wartości 1 kN przyłożone jest w osi pasa górnego kratownicy. Podpory konstrukcji zostały dobrane tak, aby panel pracował w schemacie statycznym wspornika. Ponadto, w miejscach, gdzie do pasa górnego dźwigara kratowego w rzeczywistej konstrukcji dochodzą krzyżulce, zadano podpory blokujące przemieszczenia w kierunku pionowym (UZ). Uznano, że przybliżenie to (w rzeczywistości podparcie pasa w tych miejscach ma charakter sprężysty) w przypadku analizowanego problemu jest wystarczająco dokładne.

### 3. Procedury analityczne

Podstawą do pracy nad zagadnieniem będącym tematem tego artykułu są wytyczne European Convention for Constructional Steelwork (ECCS) pt. „European Recommendations for the application of Metal Sheeting acting as a Diaphragm” z roku 1995 [2]. Publikacja ta znalazła swoje odzwierciedlenie również w Eurokodzie 3 [8].

Zgodnie z [2], tarcza dachowa jest zespołem pojedynczych przepon (paneli, diafragm), których definicję determinuje zorientowanie tworzącej fałd blachy

w stosunku do długości dachu (ułożenie prostopadłe – typowe dla dachu płaskiego lub równoległe - typowe dla dachu bezpłaskiego). Wymiar  $a$  pojedynczej przepony jest zawsze wymiarem prostopadłym do tworzącej fałd blachy, natomiast wymiar  $b$  – wymiarem równoległym. Ponadto procedury obliczania podatności przepony na ścinanie różnią się w zależności od umiejscowienia „stężeń pionowych” (elementów konstrukcyjnych odprowadzających siły do poziomu fundamentu). Zgodnie z tą klasyfikacją wyszczególniono:

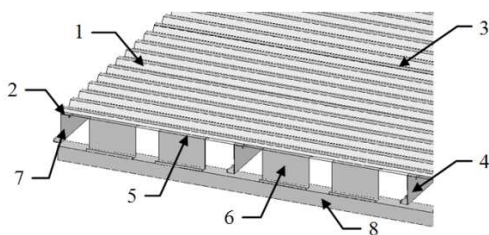
- „diaphragm beam”, czyli „przepona belkowa” (tzw. „zespół przepon”) – zespół paneli tworzących tarczę dachową pracuje wówczas w schemacie belki wolno-odparte, co ma miejsce w przypadku typowego dachu hali na planie prostokąta,
- „cantilever diaphragm”, czyli „przepona wspornikowa” (tzw. „pojedyncza przepona”) - panel pracuje w schemacie wspornika.

Dwie powyżej przedstawione klasyfikacje pozwalają wybrać jeden z czterech zestawów wzorów, za pomocą których można analitycznie obliczyć (oszacować) podatność średnią przepony na ścinanie. Model będący przedmiotem analizy jest przypadkiem „przepony wspornikowej” w systemie płaskim.

Metoda obliczania podatności przepony na ścinanie zaproponowana w [2] jest metodą składnikową. Podatność jest sumą podatności wywołanych przez:

- odkształcenie blachy: spaczenie profilu blachy (składnik  $c_{1,1}$ ) i odkształcenie postaciowe (składnik  $c_{1,2}$ ),
- odkształcenie łącznika lub połączenia: łącznika głównego (składnik  $c_{2,1}$ ), łącznika uszczelniającego (składnik  $c_{2,2}$ ) oraz łącznika pośredniego lub połączenia między płatwią a dźwigarem (składnik  $c_{2,3}$ ),
- siły w płatwiach: odkształcenie osiowe w płatwiach (składnik  $c_3$ ).

Źródła podatności przepony poddanej ścinaniu (jej składowe) przedstawiono w widoku aksonometrycznym na rys. 3. Przykładowe wartości poszczególnych składowych podatności panelu obliczone zgodnie z procedurą [2] dla modeli w wariantach „11” i „21” (charakterystyka wariantów w tabeli 3), zestawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Źródła podatności przepony poddanej ścinaniu:

1–blacha trapezowa ( $c_{1,1}$ ,  $c_{1,2}$ ), 2–łącznik główny ( $c_{2,1}$ ), 3–łącznik uszczelniający ( $c_{2,2}$ ), 4–połączenie płatw/dźwigar ( $c_{2,3}$ ), 5–łącznik pośredni ( $c_{2,3}$ ), 6–element pośredni, 7–element krawędziowy–płatw ( $c_3$ ), 8–pas góry kratownicy

Fig. 3. Components of shear flexibility of the diaphragm:

1–trapezoidal sheeting ( $c_{1,1}$ ,  $c_{1,2}$ ), 2–sheet/purlin fastener ( $c_{2,1}$ ), 3–seam fastener ( $c_{2,2}$ ), 4–purlin/rafter connection ( $c_{2,3}$ ), 5–sheet/shear connector fastener ( $c_{2,3}$ ), 6–shear connector, 7–edge member–purlin ( $c_3$ ), 8–top chord of the truss

Tabela 1. Składowe podatności przepony wyznaczone analitycznie zgodnie z [2] – warianty „11” i „21”

Table 1. Components of shear flexibility of the diaphragm calculated analytically according to [2] – variants „11” and „21”

Składnik podatności		Wartość podatności na ścinanie [mm/kN]			
		Blacha (T1)		Blacha (T2)	
		$t = 0,7 \text{ mm}$	$t = 0,6 \text{ mm}$	$t = 0,7 \text{ mm}$	$t = 0,6 \text{ mm}$
$c_{1,1}$		0,0674	0,0991	0,0871	0,1280
$c_{1,2}$		0,0259	0,0303	0,0283	0,0330
$c_{2,1}$		0,0175	0,0175	0,0175	0,0175
$c_{2,2}$		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$c_{2,3}$	4 krawędzie (4K)	0,0438	0,0438	0,0438	0,0438
	2 krawędzie (2K)	1,1520	1,1520	1,1520	1,1520
$c'$	4 krawędzie (4K)	0,155	0,191	0,177	0,222
	2 krawędzie (2K)	1,263	1,299	1,285	1,331
$c_3$		0,023	0,023	0,023	0,023
$c$	<b>4 krawędzie (4K)</b>	<b>0,178</b>	<b>0,214</b>	<b>0,200</b>	<b>0,246</b>
	<b>2 krawędzie (2K)</b>	<b>1,286</b>	<b>1,322</b>	<b>1,308</b>	<b>1,354</b>

Wartości poszczególnych składowych podatności przepony przedstawione w tabeli 1 otrzymano dla następujących założeń:

- parametry stali:  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,3$ ,
- geometria układu konstrukcyjnego (wymiary  $a$  i  $b$ , liczba płatwi  $n_p$ , liczba arkuszy po długości  $b$  przepony  $n_b$ ) – jak na rys. 2,
- geometria przekroju blachy trapezowej ( $d$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $\theta$ ,  $t$ ) – jak na rys. 1, przy czym grubość arkusza blachy netto  $t = 0,7 \text{ mm}$  (wariant „11”) albo  $t = 0,6 \text{ mm}$  (wariant „21”),
- szerokość arkusza blachy:  $750 \text{ mm}$ ,
- $p = 150 \text{ mm}$  – rozstaw łączników głównych (mocowanie w każdej fałdzie, więc  $p = d$ ),
- $n_{sc} = 16$  – liczba łączników pośrednich dla jednego zewnętrznego dźwigara,
- $A = 8,14 \text{ cm}^2$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego elementu krawędziowego (płatew Z 250 x 60 x 2).

Następnie na podstawie odpowiednich stabelaryzowanych zależności [2] określono m.in. wartości:

- $s_{pr} = 2,6 \text{ mm/kN}$  – przemieszczenie górnej stopki płatwi w połączeniu płatew/dźwigar na jednostkę siły; przyjęto jak dla dwuteownika 254 x 102 ( $22 \text{ kg/m}$ ),
- $s_p = 0,35 \text{ mm/kN}$  – poślizg łączników głównych na jednostkę siły; przyjęto jak dla wkrętów z kołnierzem i neoprenową podkładką,
- $s_{sc} = 0,35 \text{ mm/kN}$  – poślizg łączników pośrednich na jednostkę siły; przyjęto jw.,

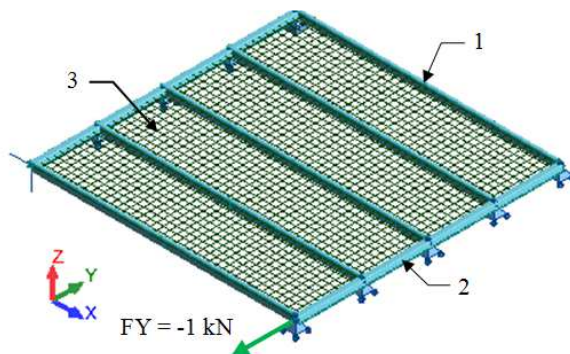
- $s_s = 0$  mm/kN – poślizg łączników uszczelniających na jednostkę siły (podatności łączników uszczelniających nie uwzględniono w modelach numerycznych).

Należy pamiętać, że pełne procedury zawarte w [2], pozwalające uwzględnić pracę tarczową poszycia w projektowaniu konstrukcji, mogą być zastosowane tylko w przypadku spełnienia określonych założeń, takich jak: wszystkie ramy w konstrukcji są takie same, wszystkie pojedyncze przepony są takie same, wszystkie fundamenty i inne warunki (np. stężenia) są podobne (i symetryczne). Ograniczenia dotyczą również stosowalności poszczególnych wzorów, np. formuła na składnik podatności przepony  $c_{1,1}$  ma zastosowanie dla określonej geometrii panelu ( $b / p \geq 10$ ). Gdy warunki te nie zachodzą, zaleca się analizy numeryczne.

## 4. Model numeryczny (analityczno-numeryczny)

### 4.1. Elementy modelu numerycznego

Podstawowe informacje nt. przyjętego układu konstrukcyjnego przedstawiono w punkcie 2 oraz na rys. 2. Izometryczny widok modelu numerycznego odwzorowującego omawiany panel pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Analizowana przepona – widok izometryczny w ARSA:  
1–płatew, 2–pas górny kratownicy, 3–siatka ES powłoki ortotropowej

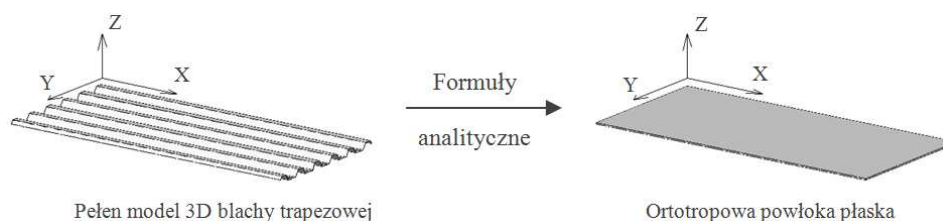
Fig. 4. Diaphragm used in the analyses – isometric view in ARSA:  
1–purlin, 2–top chord of the truss, 3–FE mesh of the orthotropic plate

Pasy górne dźwigarów kratowych oraz płatwie zdefiniowano za pomocą elementów prętowych (o przekrojach rzeczywistych). Zmniejszyło to wymaganą moc obliczeniową komputera i nie wykluczyło możliwości wykorzystania modelu przepony w analizie przestrzennej całej konstrukcji. Blachę trapezową natomiast zdefiniowano za pomocą elementów powłokowych dwóch typów, których opis zamieszczono w punkcie 4.2.



## 4.2. Modele blachy trapezowej

Idea zastosowana w podejściu numerycznym do modelowania blachy trapezowej polega na zastąpieniu jej modelem powłoki ortotropowej, co schematycznie przedstawiono na rys. 5. Zabieg ten redukuje wymaganą moc obliczeniową komputera i rozmiar plików wyników, co może być szczególnie ważne przy większych modelach numerycznych, np. całej hali. Ponadto, uniknięcie pełnego modelu blachy 3D zmniejsza pracochłonność budowy modelu. Jest to oczywiście metoda przybliżona. Zakłada m.in. symetryczność przekroju oraz że wymiary fałd są małe w porównaniu z wymiarem całego arkusza blachy i nie uwzględnia lokalnej zmiany sztywności (model tarczy o zastępczej stałej grubości).



Rys. 5. Idea zastąpienia blachy trapezowej powłoką ortotropową, na podstawie [9]

Fig. 5. The idea of substitution the fully 3D-modelled trapezoidal sheeting by the orthotropic 2D plate model, based on [9]

Proces zastąpienia blachy trapezowej modelem powłoki ortotropowej polega na poszukiwaniu takich macierzy sztywności charakteryzujących zastępczą powłokę, które odwzorowują właściwości blachy wynikające z ortotropii strukturalnej, tj. różnej sztywności we wzajemnie prostopadłych kierunkach. Zastosowane modele analizowanej blachy trapezowej, z uwagi na sposób ich definiowania, można podzielić na dwie grupy:

- predefiniowana ortotropowa powłoka płaska w 3D o wprowadzanej przez użytkownika geometrii przekroju poprzecznego blachy trapezowej (MA),
- ortotropowa powłoka płaska w 3D o definiowanych przez użytkownika macierzach sztywności ortotropowej (MB).

Budując modele blachy trapezowej za pomocą powłoki ortotropowej należy zwrócić szczególną uwagę na zgodność kierunków ortotropii powłoki zastępczej z odpowiadającymi kierunkami ortotropii blachy trapezowej. W konwencji osi współrzędnych w programie ARSA [4] kierunek lokalnej osi X powłoki (kierunek główny ortotropii) jest równoległy do tworzącej fałd blachy, a kierunek lokalnej osi Y powłoki – prostopadły (jak na rys. 5), natomiast w [3, 9, 10] konwencja jest przeciwna (kierunek X prostopadły do tworzącej fałd blachy, kierunek Y – równoległy). Z uwagi na to, że macierze wyznaczone dla modeli (MB) na podstawie [3, 9, 10] wprowadzono następnie do modelu numerycznego, stosowaną w artykule konwencję osi ujednolicono, przyjmując obowiązującą w ARSA.

W programach komputerowych umożliwiających numeryczną analizę przestrzenną konstrukcji (np. ARSA, RFEM) zaimplementowane są narzędzia (predefiniowane ortotropowe powłoki płaskie dla typu konstrukcji 3D), dzięki którym użytkownik nie musi sam wyznaczać macierzy sztywności zastępczej płyty, a są one generowane przez program na podstawie wprowadzonej geometrii przekroju poprzecznego blachy trapezowej. Z takiego narzędzia skorzystano tworząc modele (MA).

Przykładowe macierze sztywności tarczowej  $\mathbf{D}$ , sztywności giętej  $\mathbf{K}$  oraz sztywności ścinania  $\mathbf{H}$  (oznaczenia i nazewnictwo zgodne z programem ARSA), które odczytano w programie ARSA dla modeli (MA), a wyznaczone zostały przez program na podstawie zadanej przez użytkownika geometrii blachy trapezowej (T2) o grubości arkusza  $t = 0,7$  mm (warianty „11”, „12”, „13” zgodnie z tabelą 3), miały postać:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 213410,12 & 4,65 & 0 \\ 4,65 & 15,5 & 0 \\ 0 & 0 & 42796,17 \end{bmatrix} \text{kN/m} \quad (1)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 68,73 & 0,00 & 0 \\ 0,00 & 0,00 & 0 \\ 0 & 0 & 24,06 \end{bmatrix} \text{kN} \cdot \text{m} \quad (2)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 33975,39 & 0 \\ 0 & 57326,35 \end{bmatrix} \text{kN} \cdot \text{m} \quad (3)$$

Z kolei modele (MB) zbudowano, korzystając z wybranych formuł analitycznych na macierze sztywności zastępczej płyty ortotropowej dla blachy trapezowej zgodnie z [3, 9, 10]. Należy podkreślić, że podawane w literaturze ww. wzory analityczne często znacznie się od siebie różnią. Do przedstawianych analiz wybrano jedno ze znanych podejść analitycznych.

Wyrazy macierzy sztywności tarczowej  $\mathbf{D}$  obliczono na podstawie [3]:

$$\mathbf{D} = \frac{t}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}} \begin{bmatrix} E_x & \nu_{yx} \cdot E_x & 0 \\ \nu_{xy} \cdot E_y & E_y & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}) \cdot G_{xy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$E_x = E \cdot \frac{l_p}{d} \quad (5)$$

$$E_y = E \cdot \frac{I_y^0}{I_y} \quad (6)$$

$$v_{yx} = v \cdot \frac{E_y}{E_x} \quad (7)$$

$$v_{xy} = v \quad (8)$$

$$G_{xy} = \frac{a}{b \cdot t \cdot (c_{1,1} + c_{1,2})} \quad (9)$$

gdzie:  $t$  – grubość arkusza blachy trapezowej = grubość zastępczej płyty ortotropowej;

$v$  – współczynnik Poissona;

$E$  – moduł sprężystości podłużnej stali;

$I_y^0$  – moment bezwładności prostokątnego przekroju zastępczego tarczy;

$I_y$  – moment bezwładności przekroju blachy trapezowej;

$l_p$  – długość linii rozwinięcia jednej fałdy blachy trapezowej;

$d$  – szerokość jednej fałdy blachy trapezowej;

$a, b$  – wymiary przepony;

$c_{1,1}, c_{1,2}$  – składniki podatności przepony na ścinanie wyznaczone analitycznie [2].

Macierz sztywności tarczowej  $D$ , wyznaczona dla modelu (MB) tej samej przepony z blachy trapezowej (T2) o grubości arkusza  $t = 0,7$  mm przyjęła postać:

$$D = \begin{bmatrix} 194204,48 & 4,23 & 0 \\ 4,23 & 14,11 & 0 \\ 0 & 0 & 8665,51 \end{bmatrix} \text{ kN/m} \quad (10)$$

Procentowe stosunki wartości wyrazów macierzy  $D$  w modelach (MA) i (MB) dla przepony z blachy trapezowej (T2) o grubości arkusza  $t = 0,7$  mm wyniosły:

$$\frac{D_{MB}}{D_{MA}} \cdot 100\% = \begin{bmatrix} 91 & 91 & 0 \\ 91 & 91 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{bmatrix} \% \quad (11)$$

Otrzymane macierze sztywności tarczowej  $D$  w modelach (MA) i (MB) różnią się więc znacząco (ok. 5-krotnie) składnikiem  $D_{33}$ . W procedurze zaimplementowanej w ARSA (MA) składnik ten uzależniono jedynie od geometrii przekroju blachy i właściwości materiału, zgodnie ze wzorem [4], który po przekształceniach przybiera postać:

$$D_{33} = G \cdot t \cdot \frac{d}{l_p} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \cdot t \cdot \frac{d}{l_p} \quad (12)$$

W modelu (MB), wyznaczając składnik  $D_{33}$  (wzory 4 - 9) uwzględniono natomiast wymiary przepony ( $a$ ,  $b$ ) i składniki podatności na ścinanie przepony  $c_{1,1}$  i  $c_{1,2}$  [2]. Składnik  $c_{1,1}$  (skutek spaczenia profilu blachy), zależy od geometrii blachy, ale również m.in. od sposobu mocowania arkusza do płatwi (w każdej fałdzie/co drugą) oraz od liczby arkuszy po szerokości przepony.

Wartości wyrazów macierzy sztywności giętej  $\mathbf{K}$  obliczono zgodnie z [9]:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} E \cdot \frac{I_y}{0,5 \cdot d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d}{l_p} \cdot \frac{E \cdot t^3}{12} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 + \nu)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Formuły na ww. wartości wyrazów macierzy  $K_{11}$  i  $K_{22}$  znajdują również potwierdzenie w [2], tj. wynikają ze wzorów tam podanych i uproszczenia  $(1 - \nu^2) \approx 1$ . Moment bezwładności  $I_y$  obliczono ze wzoru 14 [10] (definicja zmiennych na rys. 1):

$$I_y = \frac{t}{2} \cdot \left[ \frac{4h^3}{3 \sin(90^\circ - \theta)} + 2h^2 \left( d - \frac{2h}{\tan(90^\circ - \theta)} \right) \right] \quad (14)$$

Macierz sztywności giętej  $\mathbf{K}$ , wyznaczona dla modeli (MB) przepony z blachy trapezowej (T2) o grubości arkusza  $t = 0,7$  mm miała postać:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 62,54 & 0 & 0 \\ 0 & 0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (15)$$

W obu typach modeli (MA) i (MB) wartości wyrazów macierzy sztywności ścinania  $\mathbf{H}$  przyjęto takie same, np. dla blachy trapezowej (T2) o grubości arkusza  $t = 0,7$  mm zgodnie ze wzorem 3.

#### 4.3. Odwzorowanie połączeń

Podatności połączeń i łączników występujących w konstrukcji (rys. 3) mają bardzo duży wpływ na podatność tarczy dachowej. Poszukiwano zastępczego modelu numerycznego, który może zostać zastosowany w modelach całych konstrukcji, a więc odwzorowującego z zadowalającą dokładnością podatności połączeń elementów konstrukcji przy stosunkowo niewielkim stopniu skomplikowania modelu numerycznego i zwiększenia objętości jego pliku. Wykorzystano

metodę przedstawioną w [3], polegającą na uwzględnieniu właściwości połączeń i łączników elementów konstrukcji za pomocą specjalnych prętów pomocniczych w postaci belkowego elementu skończonego o schemacie statycznym wspornika. Celem było odwzorowanie podatności teoretycznych  $s$  połączeń, które przyjęto zgodnie z [2]. Wyjątek stanowiła podatność połączenia dźwigar/płatew na kierunku globalnym X, której wartość przyjęto jak w [3]. Znając wartość  $s$  i wykorzystując wzór na maksymalne wychylenie wspornika obciążonego siłą skupioną na jego swobodnym końcu, dla przyjętej długości pręta pomocniczego  $l_{eq}$  [3] wyznaczono, zgodnie ze wzorem 16, momenty bezwładności  $I_{eq}$ , jakie należało zadać zastępczym elementom belkowym. Korzystając z opisanej metody odwzorowano rozmieszczenie i podatność łączników głównych oraz połączenia dźwigar/płatew, a także – w przypadku (4K) – łączników pośrednich. Aby nie zwiększać liczby zmiennych, od których zależą wyniki i ich poprawność, w analizach pominięto łączniki uszczelniające. Przykładowe momenty bezwładności  $I_{eq}$  prętów pomocniczych przyjęte dla wariantów „11”, „13”, „21”, „23” (opis wariantów w punkcie 5) wyznaczono w tabeli 2.

$$I_{eq} = \frac{l_{eq}^3}{3sE} \quad (16)$$

Tabela 2. Przyjęcie przekrojów prętów pomocniczych – warianty „11”, „13”, „21”, „23”

Table 2. Calculations of cross sections of equivalent beam elements used in the analyses – variants „11”, „13”, „21”, „23”

Lp.	Rodzaj łącznika / połączenia	Długość pręta [3] $l_{eq}$ [mm]	Podatność teoretyczna $s$ [mm/kN]	Moment bezwładności $I_{eq}$ [mm <sup>4</sup> ]	Przyjęty przekrój zastępczy
1	Łącznik główny	1	0,35	0,00454	Pręt $\phi = 0,55$ mm
2	Połączenie dźwigar/płatew y-y	10	0,005	317,46032	Blacha 17,17 x 0,75 mm, długość 10 mm
	Połączenie dźwigar/płatew z-z	10	2,6	0,61050	
3	Łącznik pośredni	11	0,35	6,03628	Pręt $\phi = 3,32$ mm

## 5. Schemat przeprowadzonych porównań

Wykorzystując dwa typy modeli blachy trapezowej (MA) i (MB) przeanalizowano przepony dachowe podparte na dwóch (2K) i czterech (4K) krawędziach, każda z blachy trapezowej o różnej geometrii (T1) i (T2) (rys. 1) i różnej grubości. W tabeli 3 zestawiono analizowane przypadki. Parametry nie ujęte w tabeli 3 były stałe (opis w punkcie 3).

Tabela 3. Zestawienie wartości zmiennych w poszczególnych wariantach modeli przepon

Table 3. Comparison of values of variables in all variants of the diaphragm models

Wariant	$s_{pr}$ [mm/kN]	$s_p$ [mm/kN]	$s_{sc}$ [mm/kN]	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	$t$ [mm]
11	2,6	0,35	0,35	814	0,7
12	<u>1,4</u>	<u>0,10</u>	0,35	814	
13	2,6	0,35	0,35	<u>1648</u>	
21	2,6	0,35	0,35	814	0,6
22	<u>1,4</u>	<u>0,10</u>	0,35	814	
23	2,6	0,35	0,35	<u>1648</u>	

## 6. Wyniki

W tabelach 4 - 7 zestawiono wartości podatności na ścinanie przepon uzyskane w programie ARSA oraz na podstawie zależności analitycznych określonych wg [2] („ECCS”). Obliczono błąd bezwzględny  $\Delta$  (różnicę wartości „ECCS” i wartości „ARSA”) oraz błąd względny procentowy % odniesiony do wartości otrzymanej analitycznie.

Tabela 4. Podatność na ścinanie przepony – podparcie 2K, model MA

Table 4. Shear flexibility of diaphragm – two sides fastening, model MA

Symbol modelu	Podatność na ścinanie przepony [mm/kN] - podparcie 2K							
	T1				T2			
	ECCS	ARSA	$\Delta$	%	ECCS	ARSA	$\Delta$	%
MA_011	1,286	1,174	0,112	8,7	1,308	1,175	0,133	10,2
MA_012	0,714	0,649	0,065	9,1	0,736	0,651	0,085	11,5
MA_013	1,274	1,155	0,119	9,3	1,296	1,157	0,139	10,7
MA_021	1,322	1,179	0,143	10,8	1,354	1,181	0,173	12,8
MA_022	0,750	0,655	0,095	12,7	0,781	0,656	0,125	16,0
MA_023	1,310	1,160	0,150	11,5	1,342	1,162	0,180	13,4

Tabela 5. Podatność na ścinanie przepony – podparcie 2K, model MB

Table 5. Shear flexibility of diaphragm – two sides fastening, model MB

Symbol modelu	Podatność na ścinanie przepony [mm/kN] - podparcie 2K							
	T1				T2			
	ECCS	ARSA	$\Delta$	%	ECCS	ARSA	$\Delta$	%
MB_011	1,286	1,249	0,037	2,9	1,308	1,271	0,037	2,8
MB_012	0,714	0,725	-0,011	-1,5	0,736	0,747	-0,011	-1,5
MB_013	1,274	1,230	0,044	3,5	1,296	1,252	0,044	3,4
MB_021	1,322	1,288	0,034	2,6	1,354	1,320	0,034	2,5
MB_022	0,750	0,763	-0,013	-1,7	0,781	0,796	-0,015	-1,9
MB_023	1,310	1,268	0,042	3,2	1,342	1,301	0,041	3,1

Tabela 6. Podatność na ścinanie przepony – podparcie 4K, model MA

Table 6. Shear flexibility of diaphragm – four sides fastening, model MA

Symbol modelu	Podatność na ścinanie przepony [mm/kN] - podparcie 4K							
	T1				T2			
	ECCS	ARSA	$\Delta$	%	ECCS	ARSA	$\Delta$	%
MA_011	0,178	0,121	0,057	32,0	0,200	0,122	0,078	39,0
MA_012	0,166	0,107	0,059	35,5	0,188	0,109	0,079	42,0
MA_013	0,166	0,109	0,057	34,3	0,188	0,111	0,077	41,0
MA_021	0,214	0,124	0,090	42,1	0,246	0,127	0,119	48,4
MA_022	0,202	0,110	0,092	45,5	0,233	0,113	0,120	51,5
MA_023	0,202	0,113	0,089	44,1	0,234	0,115	0,119	50,9

Tabela 7. Podatność na ścinanie przepony – podparcie 4K, model MB

Table 7. Shear flexibility of diaphragm – four sides fastening, model MB

Symbol modelu	Podatność na ścinanie przepony [mm/kN] - podparcie 4K							
	T1				T2			
	ECCS	ARSA	$\Delta$	%	ECCS	ARSA	$\Delta$	%
MB_011	0,178	0,193	-0,015	-8,4	0,200	0,215	-0,015	-7,5
MB_012	0,166	0,179	-0,013	-7,8	0,188	0,201	-0,013	-6,9
MB_013	0,166	0,182	-0,016	-9,6	0,188	0,204	-0,016	-8,5
MB_021	0,214	0,229	-0,015	-7,0	0,246	0,261	-0,015	-6,1
MB_022	0,202	0,215	-0,013	-6,4	0,233	0,247	-0,014	-6,0
MB_023	0,202	0,218	-0,016	-7,9	0,234	0,250	-0,016	-6,8

## 7. Obserwacje

Porównano dwa narzędzia dostępne w programie ARSA, a więc również w większości innych inżynierskich programów do modelowania numerycznego konstrukcji, w których możliwe jest korzystanie z powłokowych elementów skończonych. Na etapie budowy modelu zaobserwowano, że:

- charakterystyka zastępczego modelu ortotropowego blachy trapezowej zależy od wyboru metody jej wyznaczania; nie ma jednego ścisłego rozwiązania analitycznego tego problemu, co utrudnia interpretowanie rezultatów analiz i może prowadzić do błędnych wniosków,
- otrzymane macierze sztywności tarczowej w modelach (MA) i (MB) różnią się znacząco (ok. 5-krotnie) składnikiem  $D_{33}$ , który wpływa na wartość podatności analizowanej przepony,
- model (MA) nie uwzględnia podatności przepony wynikającej ze spaczenia profilu blachy, natomiast model (MB) w sposób pośredni ją odwzorowuje (składnik  $D_{33}$  zależny jest od analitycznie wyznaczonej wartości  $c_{1,1}$ ),
- zastępcze ortotropowe modele numeryczne blachy trapezowej nie odwzorowują lokalnych zmian sztywności blachy,

- narzędzia zaimplementowane w komercyjnych programach komputerowych do numerycznej analizy przestrzennej konstrukcji, takie jak zastosowane w modelach (MA) predefiniowane ortotropowe powłoki płaskie, są niewątpliwie dużym ułatwieniem dla projektanta; należy jednak pamiętać, że program komputerowy wykorzystuje jedną ze znanych procedur wyznaczania macierzy sztywności zastępczej płyty ortotropowej, ograniczoną pewnymi założeniami i opartą na przybliżeniach.

Uzyskane wyniki pokazały, że:

- przepony zbudowane za pomocą predefiniowanej powłoki płaskiej o geometrii blachy trapezowej, tj. modele (MA) charakteryzowały się mniejszą podatnością na ścinanie niż przepony zbudowane za pomocą powłoki płaskiej definiowanej wprowadzanymi przez użytkownika macierzami sztywności, tj. modele (MB),
- lepszą zgodność z rozwiązaniem analitycznym w obu przypadkach podparcia paneli (2K i 4K) uzyskano w modelach (MB); błąd względny procentowy wyniósł  $-1,9 \div 3,5\%$  w przypadkach (2K) i  $6,0 \div 9,6\%$  w przypadkach (4K),
- w modelach (MB) dla modeli przepony różniących się tylko blachą (grubością  $t$  i wysokością  $h$ ), a o stałych pozostałych parametrach (np. dla wariantów T1\_11, T2\_11, T1\_21 i T2\_21 zarówno dla 2K jak i dla 4K) uzyskano zbliżony błąd bezwzględny  $\Delta$ , natomiast w przypadku wariantowania parametrów niezależnych od blachy, wartość  $\Delta$  zmieniała się; może to oznaczać, że zastępczy model blachy zastosowany w (MB) jest w niewielkim stopniu wrażliwy na zmianę parametrów blachy, czyli poprawnie odwzorowuje blachę, a błąd bezwzględny  $\Delta$  wynika z niedoskonałości odwzorowania połączeń elementów; zidentyfikowanie i wyeliminowanie tego błędu pozwoliłoby uzyskać lepszą zbieżność wyników numerycznych z wartościami analitycznymi,
- podparcie (4K) znacząco zwiększa sztywność przepon; z uwagi na konieczność stosowania elementów pośrednich, jest jednak w systemach płatwiowych mało praktyczne.

## 8. Podsumowanie

Przytoczone w artykule działania dały obraz podobieństw i różnic dwóch modeli obliczeniowych uwzględniających tarczową pracę pokrycia dachowego z blachy trapezowej oraz pozwoliły, na podstawie obserwacji wartości podatności na ścinanie pojedynczych przepon, skonfrontować procedury analityczne z numerycznymi i analityczno-numerycznymi. Miarą trafności analizowanego modelu obliczeniowego poszycia był poziom zgodności ww. wartości podatności. Zgodnie z tym kryterium zastępczy model blachy trapezowej (MB) poprawniej odzwierciedlał współpracę poszycia z konstrukcją nośną hali niż model (MA). Uzyskane rezultaty dają więc podstawy do wyboru modelu numerycznego (MB) do dalszych, bardziej zaawansowanych analiz konstrukcji. W obliczu



wielu parametrów, od których zależały otrzymane rezultaty, otwartym jednak pozostaje pytanie, czy przybliżanie się do wyniku analitycznego było faktycznym zbliżaniem się do prawidłowego rozwiązania.

## Literatura

- [1] Bródka J., Garncarek R., Miłaczewski K.: Blachy fałdowe w budownictwie stalowym. Wyd. Arkady, Warszawa, 1999.
- [2] European Recommendations for the Application of Metal Sheeting Acting as a Diaphragm. Stressed Skin Design. ECCS – TC7, TWG 7.5, May 1995.
- [3] Gryniowicz M., Szlendak J.K.: FEM model of the steel building roof includes stressed skin diaphragm action effects. The International Conference on Metal Structures, Zielona Góra, 2016.
- [4] <http://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2015/PLK/>: Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015 – Pomoc dla użytkownika. {dostęp 12.02.2017 r.}.
- [5] Joó A. L., Dunai L.: Full-scale experimental tests on steel frames with various claddings. Eighth International Conference on Advances in Steel Structures, Lisbon, Portugal, July 22-24, 2015.
- [6] Lendvai A., Joó A. L.: Test based finite element development for diaphragm action. The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Timisoara, Romania, 2016.
- [7] Nagy Zs., Pop A., Mois I., Ballok R.: Stressed Skin Effect on the Elastic Buckling of Pitched Roof Portal Frames. Structures 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.001>. {dostęp 12.02.2017 r.}.
- [8] PN-EN 1993-1-3:2008. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [9] Wennberg D., Wennhage P., Stichel S.: Orthotropic Models of Corrugated Sheets in Finite Element Analysis, ISRN Mechanical Engineering, Vol. 2011, Art. ID 979532, doi:10.5402/2011/979532.
- [10] Xia Y., Friswell M.I., Saavedra Flores E.I.: Equivalent models of corrugated panels, International Journal of Solids and Structures 49 (2012) 1453-1462.

## NUMERICAL MODELS OF TRAPEZOIDAL SHEETING ACTING AS A DIAPHRAGM

### Summary

The paper presents the comparison of selected numerical models of trapezoidal cladding acting as a diaphragm which can be used in computer program called Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015. The aim of the analyses was to evaluate the validity of using these models in calculations of the structure including the stressed skin effect.

The analyses were carried out for the cantilevered diaphragm as a part of the roof of the single storey steel building. Corrugated sheets were replaced by two types of equivalent orthotropic shell models and the influence of the choice of the model on the stiffness of the diaphragm was observed. Fasteners and connections were substituted by equivalent beam finite elements and their flexibility was included in the calculations.

The evaluation of numerical models of trapezoidal sheeting was contingent upon the degree of the agreement between numerical and analytical results of the shear flexibility of analyzed diaphragms, calculated according to [2]. In compliance with this criterion, more accurate numerical model of trapezoidal cladding acting as a diaphragm was pointed.

**Keywords:** steel structures, single storey building, diaphragm, stressed skin design, orthotropic plate model

*Przesłano do redakcji: 05.10.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Michał PIĄTKOWSKI<sup>1</sup>

## METODY UWZGLĘDNIANIA IMPERFEKCJI GEOMETRYCZNYCH W KRATOWNICACH STALOWYCH

Aktualne wytyczne normowe oraz badania zalecają aby przy projektowaniu złożonych układów konstrukcyjnych, szczególnie układów ramowych, uwzględniać wpływ imperfekcji geometrycznych. W przypadku kratownicy imperfekcje mogą występować niezależnie w każdym przęciu co prowadzi do dużej różnorodności możliwych konfiguracji *imperfect*. W niniejszej pracy przedstawiono, znane z analizy ram, metody uwzględniania imperfekcji geometrycznych oraz możliwości ich zastosowania w przypadku kratownic. Wykonano obszerną analizę numeryczną pewnego modelu kratownicy w celu porównania przedstawionych metod oraz wpływu jednocześnie występujących poprzecznych imperfekcji geometrycznych obu pasów na nośność kratownicy. Rozpatrywano imperfekcje łukowe na długości całego pasa jak również pomiędzy punktami jego sztywnego podparcia bocznego. Na podstawie otrzymanych wyników opracowano ścieżki równowagi ściskanego pasa kratownicy. Opisanie i wykorzystanie, w analizie numerycznej, metody uwzględniania imperfekcji oceniono pod względem pracochłonności i możliwości ich stosowania w układach kratowych.

**Słowa kluczowe:** model imperfect; kratownice; analiza; obciążenie graniczne

### 1. Wstęp

W trakcie projektowania konstrukcji stalowych zaleca się uwzględniać występujące w nich wstępne imperfekcje geometryczne globalne i lokalne. Informacje na ten temat można znaleźć w wielu normach, m.in. w EC3; BS 5950; GB 50017 oraz AISC 360-05. Normy te, oraz dostępna literatura, omawiają głównie wpływ imperfekcji na układy ramowe o elementach pełnościennych. W takich układach uwzględnia się głównie globalne imperfekcje przechyłowe występujące w płaszczyźnie układu poprzecznego a ich maksymalna wartość jest przyjmowana wg analizy deterministycznej lub probabilistycznej [1], [8].

W kraju prowadzono obszerne badania numeryczne i doświadczalne, dotyczące dźwigarów kratowych, skupiając się na określeniu właściwej długości wyboczeniowej ściskanych pasów kratownic z poprzecznym, sztywnym lub sprężystym, podparciem pośrednim [7], [9]. Niewiele jest natomiast publikacji dotyczą-

<sup>1</sup> Michał Piątkowski, Politechnika Koszalińska, Zakład Konstrukcji Metalowych, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin; tel. 606761760; michal.piatkowski@tu.koszalin.pl

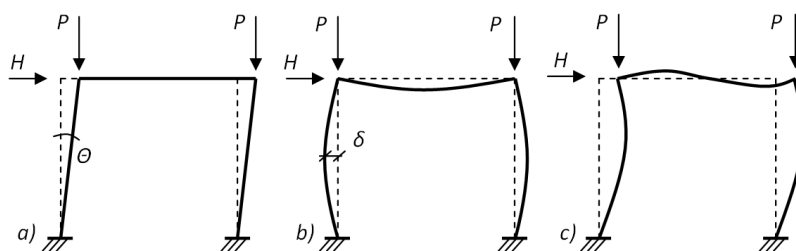
cych wpływu imperfekcji geometrycznych na nośność i stateczność kratownic. W większości są to publikacje "post factum" dotyczące błędów montażowych i awarii istniejących już konstrukcji [10], [15].

Duży wpływ na nośność ustroju kratowego mają poprzeczne imperfekcje geometryczne. Imperfekcje te mogą wystąpić jednocześnie w pasach oraz w skratowaniu. Mogą one wynikać z niedokładnego wykonania elementu lub z błędnego montażu. Ponadto mogą one być niezależne od siebie co prowadzi do dużej liczby możliwych geometrii *imperfect* analizowanej kratownicy. Wnioski te skłoniły autora do podjęcia tematu dotyczącego wpływu wstępnych imperfekcji geometrycznych „z płaszczyzny układu” na nośność i stateczność kratownic.

## 2. Rodzaje imperfekcji oraz metody ich uwzględniania

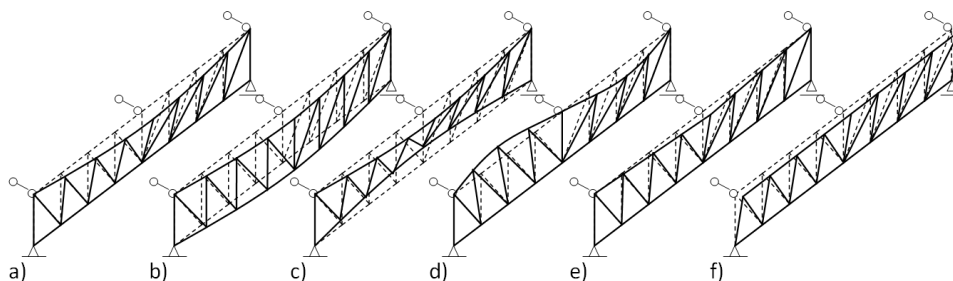
Analizując ramowe układy konstrukcyjne należy zwrócić uwagę na normowy podział imperfekcji geometrycznych na globalne, np. przechyłowe całej ramy (rys. 1. a) oraz lokalne łukowe pojedynczych elementów (rys. 1. b) [11]. Podział ten jest niewystarczający w przypadku kratownic. Wprowadzono dodatkowy podział imperfekcji pasów na łukowe imperfekcje globalne na długości całego pasa kratownicy (rys. 2. a ÷ c) oraz łukowe imperfekcje lokalne (rys. 2. d), występujące pomiędzy punktami bocznego podparcia pasa lub pomiędzy węzłami. Ponadto w kratownicach można wyróżnić imperfekcję łamaną pasa, jeżeli występuje w nim styk montażowy (rys. 2. e) oraz imperfekcję przechyłową całej kratownicy występującą w układzie ramowym złożonym z kratownic połączonych płatwiami i poszyciem dachowym (rys. 2. f).

W przypadku konstrukcji złożonej z wielu elementów, takiej jak kratownica, układ imperfekcji w poszczególnych elementach składowych jest w dużej mierze losowy. Może to prowadzić zarówno do ich wzajemnego znoszenia się, jak i wzmacniania. Jeżeli układ imperfekcji będzie maksymalnie niekorzystny, to taki element może zostać przeciążony oraz ulec awarii. Dlatego, między innymi, uwzględnianie imperfekcji w konstrukcjach złożonych jest istotne już na etapie analizy statycznej.



Rys. 1. Rodzaje imperfekcji w układach ramowych pełnościennych: a) imperfekcja globalna przechyłowa; b) imperfekcje lokalne łukowe; c) jednoczesne imperfekcje przechyłowa i łukowe

Fig. 1. Types of imperfection in frames system: a) sway global imperfection; b) local out-of-straightness imperfection; c) simultaneous sway and out-of-straightness imperfections



Rys. 2. Rodzaje imperfekcji "z płaszczyzny układu" w kratownicach (opis w tekście)

Fig. 2. Types of imperfection "out of plane" in a truss (description in the text)

Istnieje wiele metod uwzględniania imperfekcji geometrycznych w obliczeniach statycznych konstrukcji. Metody te zostały wymienione i szeroko opisane m.in. w pracach [5], [6] i [14]. Główne z nich to:

- bezpośrednie modelowanie wstępnych imperfekcji geometrycznych (modeling of Initial Geometric Imperfections - **IGI**),
- skalowanie pierwszej postaci utraty stateczności jako układu *imperfect* (scaling of first EigenBuckling Mode - **EBM**),
- stosowanie zastępczych obciążeń równoważnych (application of Notional Horizontal Forces - **NHF**),
- redukcja modułu sprężystości modelu *perfect* (reduction of member stiffness - **E<sub>red</sub>**).

Obowiązujący obecnie w Polsce Eurokod 3 zaleca uwzględnianie imperfekcji globalnych poprzez stosowanie metody **NHF** przy wykorzystaniu analizy I, jak i II rzędu [11]. Natomiast imperfekcje lokalne można uwzględniać w zależności od metody analizy:

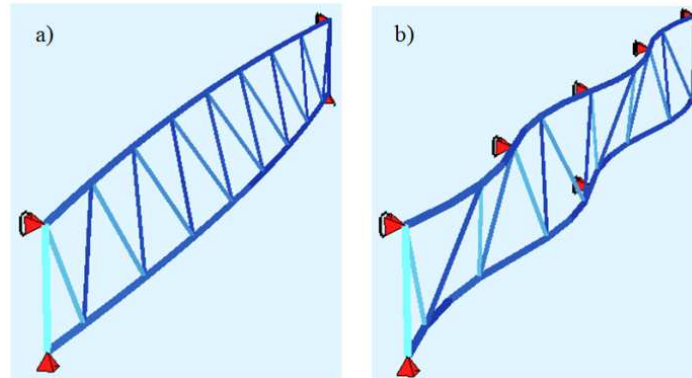
- w przypadku analizy I rzędu - poprzez formuły sprawdzania nośności elementów narażonych na wyboczenie.
- w przypadku analizy II rzędu – poprzez formuły sprawdzania nośności przekrojów. Imperfekcje lokalne należy wtedy uwzględnić za pomocą normowej metody **NHF**.

### 3. Analiza numeryczna

W celu oceny przedstawionych metod pod kątem ich przydatności dla układów kratowych wykonano obszerne analizy numeryczne. W analizach uwzględniono model kratownicy przedstawionej na rys. 3. Kratownice o takim schemacie były użyte w badaniach doświadczalnych szerzej opisanych w pracy [13].

Wykorzystując oprogramowanie **SOFISTIK** opracowano prętowy model kratownicy w układzie przestrzennym. Przyjęto sztywne połączenie wykratowania z pasami. Uwzględniano, wzrastające skokowo, grawitacyjne obciążenie śledzące przyłożone do węzłów pasa górnego. Na każdym poziomie obciążenia, przy wy-





Rys. 5. Przykładowe konfiguracje *imperfect* kratownicy (deformacje powiększone 10-krotnie): a) IMP 2 - Model 1; b) IMP LOK 2 - Model 3

Fig. 5. Examples of *imperfect* configuration of the truss (deformations enlarged 10 times): a) IMP 2 - Model 1; b) IMP LOK 2 - Model 3

### 3.2 Metoda IGI - probabilistyczna

W polskiej literaturze z ostatnich lat mało jest informacji na temat badań statystycznych dotyczących rzeczywistych imperfekcji geometrycznych wykonywanych obecnie konstrukcji. Zagraniczne badania w tym temacie opisywane były częściej, m. in. w pracy [14].

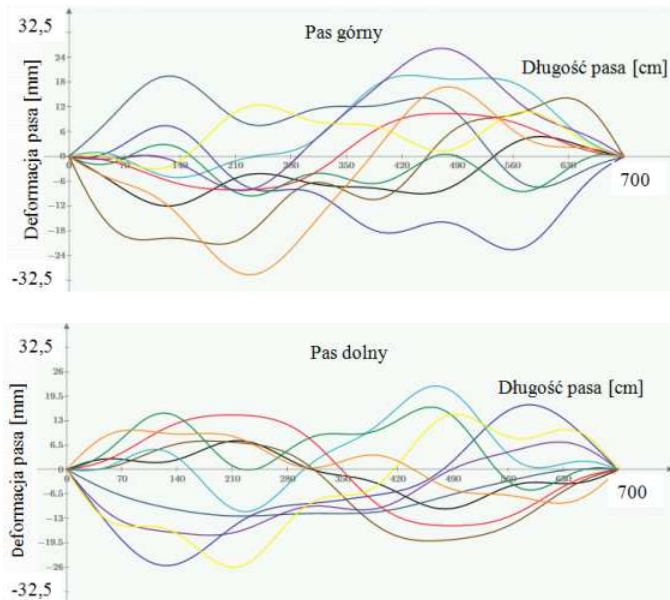
Jeżeli założymy, że wartość imperfekcji geometrycznych nie przekracza wartości dopuszczalnych, może przyjmować wartości zarówno dodatnie, jak i ujemne oraz że jest równie prawdopodobna w całym swoim przedziale, to można wybrać pewną próbę losową będącą odzwierciedleniem całej populacji [3]. W prezentowanej analizie założono, że (rys. 6):

- imperfekcje mogą przyjmować wartości dodatnie i ujemne,
- kształt wstępnej imperfekcji pasa jest opisany funkcją  $f(x)$  (wzór 1)
- wartości jej kolejnych amplitud  $e_i$  są wartościami losowymi, które nie przekraczają wartości dopuszczalnych.

Następnie wylosowano dziesięć zestawów wartości  $e_1$  oraz  $e_i$  (poszczególne układy imperfekcji pasów oznaczono P1÷ P10) dla każdego pasa. Pozwoliło to określić jego losową geometrię *imperfect* za pomocą funkcji:

$$f(x) = e_1 \sin\left(\frac{x \cdot \pi}{L}\right) + e_2 \sin\left(\frac{x \cdot 2\pi}{L}\right) + e_3 \sin\left(\frac{x \cdot 4\pi}{L}\right) + e_4 \sin\left(\frac{x \cdot 8\pi}{L}\right) \quad (1)$$

gdzie:  $e_1$  – amplituda łukowej imperfekcji globalnej,  $e_{1,max} = \pm L/500$ ,  
 $L$  – długość całkowita kratownicy,  
 $e_i$  – amplituda łukowej imperfekcji lokalnej,  $e_{i,max} = \pm L_i/200$ ,  $i = 2,3,4$ ,  
 $L_i$  – długość pasa pomiędzy stężeniami lub pomiędzy węzłami.

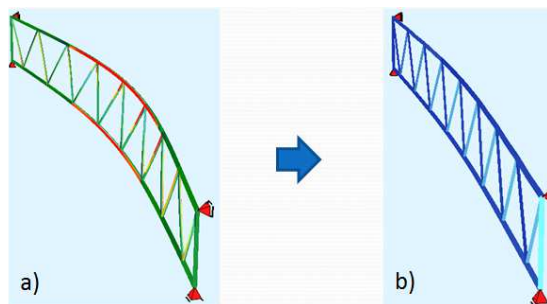


Rys. 6. Losowe imperfekcje pasów

Fig. 6. Random imperfections of the chord

### 3.3 Metoda EBM

Skalowanie pierwszej postaci utraty stateczności jako układu *imperfect* jest szczególnym przypadkiem deterministycznego wariantu metody **IGI**. Metoda ta zakłada, że najbardziej niekorzystnym układem wstępnych imperfekcji w całej konstrukcji jest układ zgodny z kształtem jej pierwszej postaci utraty stateczności. Zasada ta nie jest słuszna w przypadku konstrukcji przesztywnionych, w których

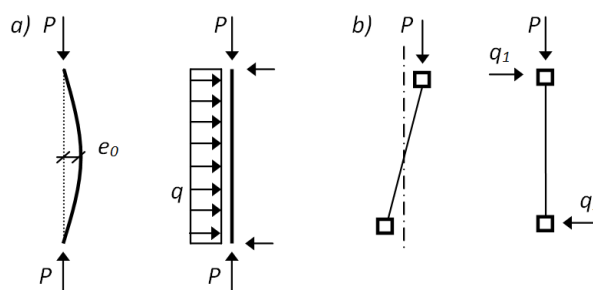
Rys. 7. Stosowanie metody EBM: a) pierwsza postać utraty stateczności kratownicy; b) konfiguracja *imperfect*Fig. 7. Principles of the EBM method application: a) first buckling mode of truss; b) *imperfect* configuration

przed utratą stateczności dochodzi do wyczerpania nośności plastycznej przekroju i zmiany pierwotnej konfiguracji geometrycznej. W prezentowanej analizie dla każdego modelu podparcia bocznego kratownicy wykonano sprężystą analizę wyboczeniową w celu określenia siły krytycznej oraz odpowiedniej postaci utraty stateczności. Następnie odpowiednio wyskalowaną konfigurację *imperfect* uwzględniono w modelu numerycznym (rys. 7).



### 3.4 Metoda NHF

Geometryczne imperfekcje są w tej metodzie zastępowane równoważnym obciążeniem poprzecznym przyłożonym do konstrukcji o konfiguracji *perfect*. Wartość tego obciążenia zależy od siły ściskającej w elemencie i wraz z nią powodują takie same deformacje jak w przypadku ściskanego pręta *imperfect*. Przyłożone do elementu obciążenie zastępcze musi być samo zrównoważone tak aby nie powodować dodatkowego wyężenia w innych, sąsiednich elementach [2]. W prezentowanej analizie kratownicy wprowadzono dodatkowe obciążenia zastępcze  $q_1$  oraz  $q_2$  przyłożone do układu *perfect* (rys. 8.b). Wartość tych obciążeń została dobrana w taki sposób, aby przy obciążeniu  $P = 0$  uzyskać deformację odpowiadającą właściwym układom imperfekcji przyjętym w metodzie **IGI**.



Rys. 8. Schemat metody NHF: a) pojedynczy pręt; b) kratownica

Fig. 8. Scheme of the NHF method: a) single element; b) truss

### 3.5 Metoda Ered

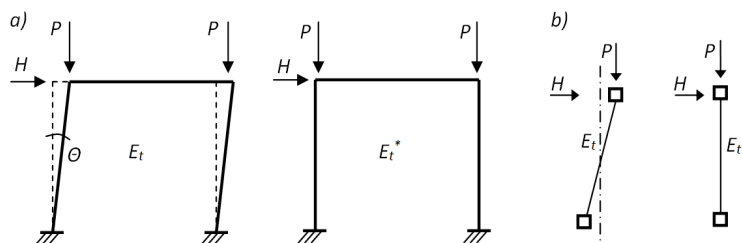
Metoda ta polega na celowym obniżeniu stycznego modułu sprężystości  $E_t$  elementu. Pozwala ona uwzględnić wpływ imperfekcji geometrycznych na zachowanie się elementu bez konieczności wprowadzania do analiz numerycznych konfiguracji *imperfect* lub obciążeń zastępczych (rys. 9.). Zredukowany moduł sprężystości  $E_t^*$  określa się na podstawie zależności (2) i (3) opracowanych zgodnie z zaleceniami amerykańskiego stowarzyszenia Column Research Council (CRC). Na podstawie licznych badań i analiz, w przypadku konstrukcji ramowych stężonych oraz niestężonych, współczynnik redukcyjny  $\xi$  określono na poziomie 0,85 [4].

$$E_t^* = \xi \cdot E \Rightarrow P \leq 0,5P_y \quad (2)$$

$$E_t^* = 4 \cdot \frac{P}{P_y} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \cdot \xi \cdot E \Rightarrow P > 0,5P_y \quad (3)$$

gdzie:  $\xi$  – współczynnik redukcyjny o wartości równej 0,85,  
 $E$  – moduł sprężystości stali,  
 $P$  – obciążenie zewnętrzne,  
 $P_y$  – nośność plastyczna przekroju elementu.

Metoda  $E_{red}$  stosowana do określenia wpływu imperfekcji "z płaszczyzny" na nośność kratownicy ma zastosowanie tylko w przypadku występowania dodatkowego obciążenia poprzecznego  $H$ . Obciążenie takie, np. wiatrem ściany szczytowej, powoduje powstanie przemieszczeń poprzecznych, które w układzie *perfect* o zredukowanym module sprężystości mają porównywalną wartość w stosunku do przemieszczeń układu *imperfect* o sztywności nominalnej. W przedstawianej analizie przyjęto różne wartości współczynników redukcyjnych (0,8; 0,85; 0,9) w celu określenia ścieżek równowagi analizowanej konstrukcji kratowej. Przyjęto również pewne obciążenie  $H = 0,05P$  przyłożone do węzłów pasa górnego kratownicy, reprezentujące oddziaływanie wiatru na ścianę szczytową.

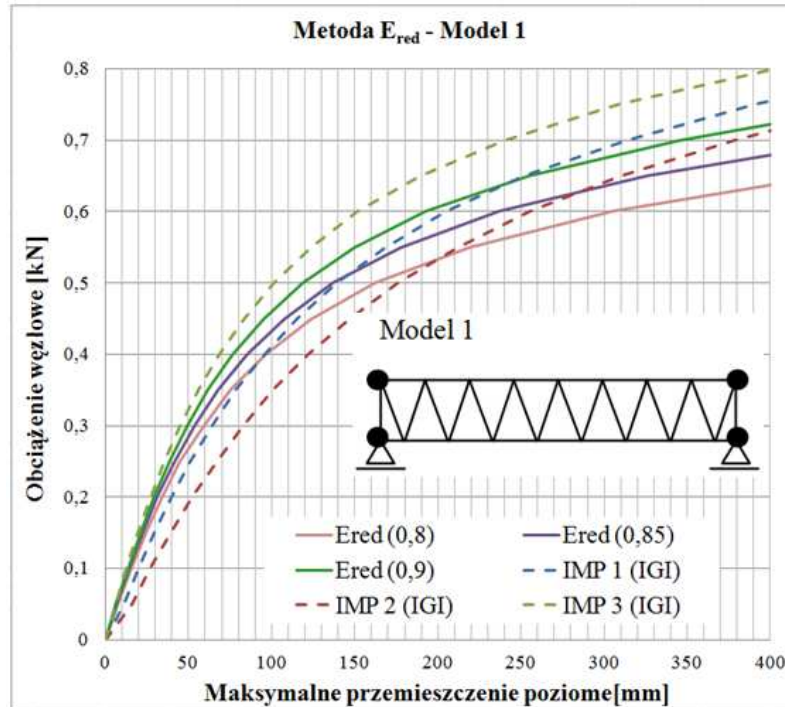


Rys. 9. Zasady zastosowania metody Ered: a) rama parterowa; b) kratownica

Fig. 9. Principles of the Ered method application: a) one-storey frame; b) truss

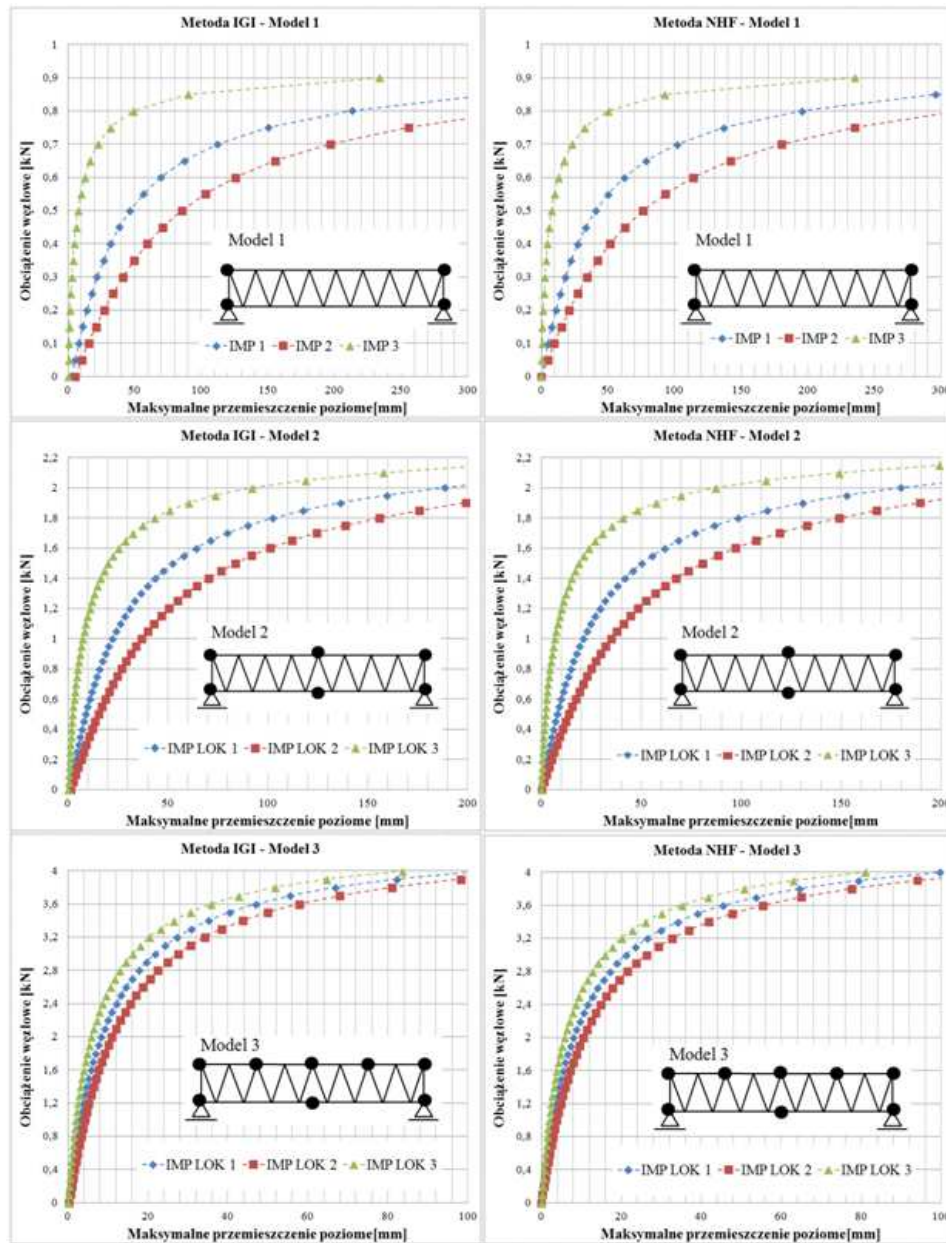
#### 4. Wyniki analizy

Przedstawione wyżej metody wykorzystano do określenia ścieżek równowagi pasa górnego analizowanego modelu kratownicy. Ścieżki te opracowano jako zależność pomiędzy wiodącym, maksymalnym przemieszczeniem poziomym ściskanego pasa kratownicy a węzłowym obciążeniem  $P$  kratownicy. Wybrane wyniki przedstawiono na rys. 10 ÷ 12. W przypadku metody  $E_{red}$  opracowano ścieżki równowagi tylko dla modelu 1. Natomiast w przypadku pozostałych metod zaprezentowane ścieżki równowagi obejmują wszystkie modele podparcia bocznego oraz przyjęte układy imperfekcji.

Rys. 10. Ścieżki równowagi pasa górnego kratownicy w metodzie  $E_{red}$  - model 1Fig. 10. Equilibrium path of the upper chord of truss,  $E_{red}$  method - model 1

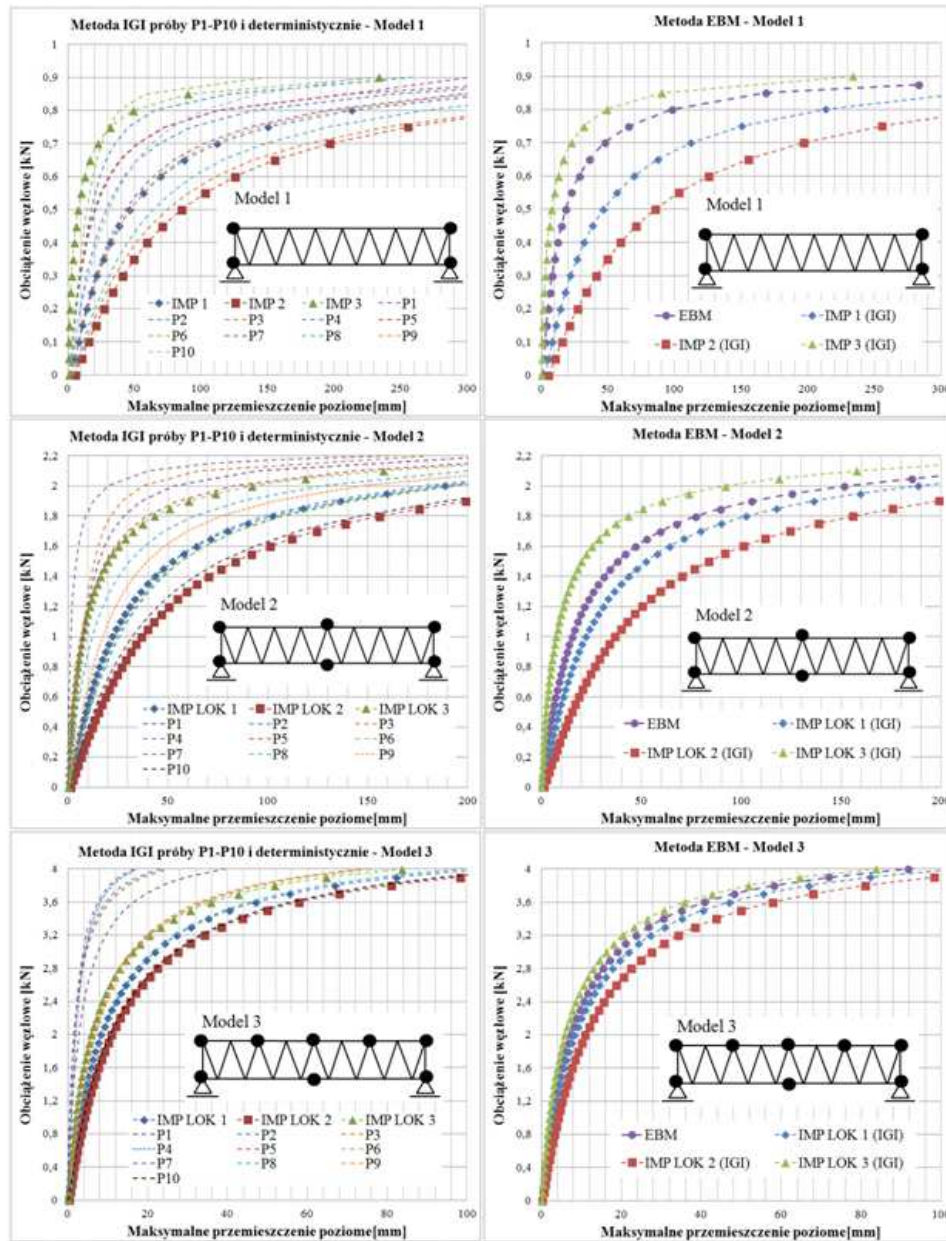
Prezentowane ścieżki równowagi dążą zawsze do wspólnej asymptoty, która odpowiada obciążeniu krytycznemu ściskanego pasa kratownicy. Z uwagi jednak na różne, przyjęte układy imperfekcji, ścieżki te charakteryzują się różnym spłaszczeniem zależnym od wstępnego skręcenia kratownicy. Można założyć, że zależność pomiędzy obciążeniem kratownicy a maksymalnym wyężeniem przekroju pasa górnego dla przyjętych układów imperfekcji i modeli podparcia jest podobna do prezentowanych ścieżek równowagi [13].

Ścieżki równowagi pasa górnego, uzyskane przy wykorzystaniu probabilistycznej metody IGI oraz metody EBM (rys. 12.), zostały przedstawione razem z wynikami uzyskanymi w deterministycznym wariacie metody IGI.



Rys. 11. Ścieżki równowagi pasa górnego kratownicy. Metoda IGI (podejście deterministyczne) oraz metoda NHF

Fig. 11. Equilibrium path of the upper chord of truss. IGI method (deterministic) and NHF method



Rys. 12. Ścieżki równowagi pasa górnego kratownicy. Metoda IGI (podejście probabilistyczne) oraz metoda EBM

Fig. 12. Equilibrium path of the upper chord of truss. IGI method (probabilistic) and EBM method

## 5. Podsumowanie

Porównanie wymienionych na wstępie metod rozpoczęto od ich oceny pod kątem pracochłonności oraz wymagań dotyczących znajomości zasad projektowania i korzystania z oprogramowania. W trakcie tworzenia modelu numerycznego wykorzystano tekstowy panel edycyjny programu komputerowego SOFISTIK, który umożliwiał wprowadzanie deformacji elementów przy użyciu funkcji parabolicznej bądź sinusoidalnej o zdefiniowanych wcześniej parametrach, takich jak maksymalne wychylenie. Pozwoliło to znacznie skrócić czas tworzenia modelu numerycznego w konfiguracji *imperfect*.

Należy stwierdzić, że deterministyczna metoda **IGI**, wymaga od projektanta największej nakładu pracy i bardzo dobrej znajomości oprogramowania. Jest to spowodowane dużą liczbą możliwych układów *imperfect*, które każdorazowo należy modelować od początku w celu określenia, który z nich jest układem najbardziej niekorzystnym.

Podobną pod względem pracochłonności metodą, zdaniem autora, jest metoda **NHF**. Pomimo, iż nie wymaga ona modelowania układu *imperfect*, to należy w niej odpowiednio dobrać obciążenie zastępcze, które spowoduje właściwą deformację układu. Dodatkowo w celu określenia najbardziej niekorzystnego układu imperfekcji konstrukcji należy wykonać kombinację obciążeń zastępczych oraz projektowych, co znacznie komplikuje proces projektowania.

Następne, podobne do siebie, pod względem pracochłonności metody to probabilistyczna metoda **IGI** oraz **EBM**. W obu tych metodach można tylko raz modelować, określony wcześniej poprzez próbę losową lub analizę stateczności, układ *imperfect*. Pozwala to znacznie skrócić cały proces definiowania modelu numerycznego

Najmniej pracochłonną jest metoda **E<sub>red</sub>** dzięki wykorzystaniu modelu *perfect*. Metoda ta nie wymaga dodatkowych obciążeń zastępczych oraz wcześniejszego poszukiwania najbardziej niekorzystnego układu imperfekcji.

Ocena ta, mimo iż w dużej mierze subiektywna, jest ważnym czynnikiem określającym przydatność wymienionych metod pod kątem zastosowania w układach kratowych.

Jak wykazały analizy, układ imperfekcji pasów kratownicy ma wpływ na ścieżkę równowagi konstrukcji, zatem również na wyężenie jej poszczególnych elementów. Dlatego też równie ważnym czynnikiem oceny wymienionych metod jest możliwość znalezienia oraz uwzględnienia najbardziej niekorzystnego układu imperfekcji. Jest to możliwe tylko przy zastosowaniu deterministycznej metody **IGI** oraz metody **NHF**. Zgodnie z wynikami powyższej analizy oraz wynikami badań doświadczalnych opisanych w pracy [13], za najbardziej niekorzystny układ imperfekcji należy uznać układ IMP 2 (Model 1) oraz IMP LOK 2 (Model 2 i Model 3) czyli układy, w których skręcenie poszczególnych przekrojów kratownicy jest największe.



Probabilistyczny wariant metody **IGI** pozwala określić konfigurację pośrednią pomiędzy układem *perfect* a układem najbardziej niekorzystnym. Warto zauważyć, że w przypadku modelu 1 prawie wszystkie ścieżki równowagi (z wyjątkiem próby P6) znajdują się w obszarze wyznaczonym pomiędzy układami IMP 3 oraz IMP 2, otrzymanymi z deterministycznej analizy **IGI**. W przypadku Modelu 2 i 3 więcej prób losowych znajduje się poza analogicznym obszarem pomiędzy IMP LOK 3 oraz IMP LOK 2. W przypadku modelu 2 są to 4 z 10 prób, natomiast w przypadku modelu 3 jest to aż 8 z 10 prób. Stosowanie metody probabilistycznej musi być oparte o niezbędne prognozy statystyczne dotyczące możliwości wystąpienia imperfekcji w projektowanej konstrukcji.

Zastosowanie metody **EBM** w przypadku układów kratowych może prowadzić do niedoszacowania wyężenia pasa ściskanego. Jest to spowodowane charakterem utraty stateczności kratownicy płaskiej. Wyskalowana postać utraty stateczności w analizowanych modelach kratownic charakteryzuje się jednostronnym wychyleniem pasa górnego i dolnego oraz niewielkim skręceniem przekroju kratownicy (pas ściskany ciągnie za sobą pas rozciągany, rys.7. a.). Jak wykazały analizy z wykorzystaniem innych metod nie jest najbardziej niekorzystny układ imperfekcji wobec tego stosowanie metody **EBM** może być niekorzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji.

Podobnie jest w przypadku metody  $E_{red}$ , która wymaga istnienia rzeczywistego obciążenia  $H$ . Obciążenie takie, np. parcie wiatru na ścianę szczytową powoduje jednostronną deformację pasów. Dlatego też otrzymane ścieżki równowagi (przy współczynnikach redukcyjnych 0,8; 0,85; 0,9) znajdują się blisko ścieżki równowagi IMP 3 przy niewielkich wartościach obciążenia  $P$ . Należy również zaznaczyć, że stosowanie współczynnika redukującego styczny moduł sprężystości  $E_t$  wpływa na zmniejszenie sztywności całej kratownicy, co prowadzi do zwiększenia przemieszczeń pionowych.

## 6. Wnioski

Przedstawione analizy numeryczne oraz ich podsumowanie pozwalają wyciągnąć kilka wniosków dotyczących uwzględniania imperfekcji geometrycznych w układach kratowych oraz wpływu imperfekcji na nośność tych układów. Wnioski te mogą być pomocne w pracach projektowych oraz wyznaczyć zakres dalszych analiz.

Układ geometrycznych imperfekcji pasów kratownicy wpływa na jej nośność i stateczność. Wpływ ten zwiększa się wraz ze wzrostem skręcenia przekroju kratownicy oraz zmniejszeniem liczby podparć bocznych.

W dostępnej literaturze krajowej brakuje informacji na temat statystycznego rozkładu geometrycznych imperfekcji wykonawczych i montażowych w produkowanych i montowanych obecnie kratownicach. Trudno więc zweryfikować założenia dotyczące kształtu i rozkładu statystycznego losowych imperfekcji w metodzie **IGI** - probabilistycznej.

Ścieżki równowagi otrzymane metodami **IGI** – deterministycznej oraz **NHF** (rys.11.) pokrywają się we wszystkich analizowanych układach imperfekcji i modelach podparcia bocznego pasów (maksymalna różnica przemieszczeń wynosi 7%). Zatem metody te można uznać za tożsame i mogą być wykorzystywane zamiennie.

W przypadku kratownic stosowanie metody **EBM** oraz  $E_{red}$  wydaje się nieuzasadnione z uwagi na pomijanie najbardziej niekorzystnego układu imperfekcji.

Dopuszczalne odchyłki zawarte w normach wykonawczych powinny gwarantować, że rzeczywiste imperfekcje nie wpłyną znacząco na nośność i stateczność konstrukcji. Zawarte w normie [12] odchyłki dotyczące wykonania i montażu kratownic są niewystarczające, ponieważ nie uwzględniają przypadku jednoczesnej, przeciwnej imperfekcji obu pasów. Rozwiązaniem tego problemu było by wprowadzenie odchyłki skrajnej całej kratownicy płaskiej. Odchyłka taka wymuszałaby na wykonawcach konieczność rektyfikacji zamontowanych kratownic i sprowadzenia obu pasów do płaszczyzny pionowej.

W pracy analizowano kratownicę ze smukłymi pasami równoległymi z uwzględnieniem niepodatnych pośrednich stężeń bocznych pasów. Następnym etapem prowadzonych analiz będzie ocena wpływu układu imperfekcji na ścieżkę równowagi kratownicy ze sprężystymi stężeniami bocznymi oraz pasami nierównoległymi o mniejszej smukłości.

## Literatura

- [1] Alvarenga Arthur R., Silveria Ricardo A. M.: Second-order plastic-zone analysis of steel frames- part II: effects of initial geometric imperfection and residual stress. *Latin Americas Journal of Solid and Structures*, 6/2009: 323-342.
- [2] Biegus Antoni: Obciążenie imperfekcyjne poziomych stężeń poprzecznych dźwigarów wspornikowych i wieloprzęsłowych. *Inżynieria i Budownictwo*, 11/201: 578-581.
- [3] Biegus Antoni: Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa - Wrocław 1999.
- [4] Chen Wai-Fah: Structural stability: from theory to practice. *Engineering Structures*, 22/2000: 116-122.
- [5] Chen Wai-Fah, Kim Seung-Eock: LRFD Steel design using advanced analysis. CRC Press, New York 1997.
- [6] Chen Wai-Fah, Lui Eric M.: Principles of structural design. Taylor and Francis, 2006.
- [7] Jankowska-Sandberg Joanna, Kołodziej Jarosław: Experimental study of steel truss lateral-torsional buckling. *Engineering Structures*, 46/2013: 165-172.
- [8] Kala Zdenek: Sensitivity analysis of steel plane frames with initial imperfections. *Engineering Structures*, 33/2011: 2342-2349.
- [9] Krajewski Marcin, Iwicki Piotr: Analysis of brace stiffness influence on stability of the truss. *Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 20(1)/2015: 97-108.
- [10] Niewiadomski Lesław: Wady stalowej konstrukcji dachu zmodernizowanej hali przemysłowej. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2011. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna "Awary Budowlane 2011".



- [11] PN-EN-1993-1-1:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN, Warszawa 2006.
- [12] PN-EN-1090-2:2012 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych, Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych. PKN, Warszawa 2012.
- [13] Piątkowski Michał: Zwężenie sprężyste kratownicy z imperfekcjami. Materiały Budowlane, 8/2016:82-83.
- [14] Shabnam Shayan, Kim Jr Rasmussen, Hao Zhang: On the modeling of initial geometric imperfections and residual stress of steel frames. Research report R935. Sydney 2012, School of Civil Engineering, The University of Sydney.
- [15] Smak Milan., Straka Bohumil.: Geometrical and structural imperfections of steel member system. Procedia Engineering, 40/2012:434-439.

## METHODS FOR TAKING INTO ACCOUNT GEOMETRICAL IMPERFECTIONS IN STEEL TRUSS

### Summary

Current normative guidelines and research suggest that the design of complicated structures, especially frame systems, should take into account the influence of geometric imperfections. In case of trusses, imperfections can occur independently of each chord, which leads to a large variety of possible imperfect configurations. In this paper the author presents a different methods of taking in to account geometric imperfections, known from frame analysis, and the possibility of using them in the case of trusses. An extensive numerical analysis of a certain truss model was made to compare the presented methods and the effect of simultaneous transverse geometrical imperfections of both chords on the limit load of the truss. Out-of-straightness imperfections were considered throughout the entire length of the chord as well as between the points of the rigid side support. Based on the obtained results, the author developed equilibrium paths of the compressed chord. Described and used in the numerical analysis, methods of taking into account imperfections were evaluated in terms of labor intensity and their applicability in truss systems.

**Keywords:** imperfect model; trusses; analysis methods; limit load

*Przesłano do redakcji: 20.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Aleksandra ŚCIUBIDŁO<sup>1</sup>  
Przemysław ŚCIUBIDŁO<sup>2</sup>

## WYKORZYSTANIE POPIOŁÓW LOTNYCH W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Synteza sorbentów z popiołów lotnych jest jednym z kierunków wykorzystania popiołów lotnych. Popiół lotny będący źródłem krzemu i glinu może być ekonomicznie i przyjaźnie dla środowiska wykorzystany do syntezy uporządkowanych materiałów mezoporowatych a otrzymane produkty z odpadu energetycznego, jakim są popioły lotne, są coraz szerzej wykorzystywane w przemyśle i inżynierii środowiska, jako adsorbenty, m.in. do oczyszczania gazów odlotowych m.in. z CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>.

W przypadku zastosowania, jako źródła krzemu popiołu lotnego należy wydobyć krzem (w formie krzemianu sodu) z popiołu. Znane są dwie metody wydobyć krzem, pierwsza z nich polega na uzyskaniu krzemianu sodu poprzez mieszanie popiołu w roztworze wodorotlenku sodu oraz druga polegająca na spiekaniu popiołu z wodorotlenkiem sodu. Druga metoda pozwala na wprowadzenie większej ilości krzemu do roztworu. W artykule przedstawiono badania dot. syntezy mezoporowatego sita molekularnego MCM-41 oraz SBA-15.

**Słowa kluczowe:** popioły lotne, mezoporowate sita molekularne, SBA-15, MCM-41

### 1. Wprowadzenie

W Polsce w procesach wytwarzania energii elektrycznej wykorzystuje się głównie węgiel. Według GUS w 2014r. zużycie energii pierwotnej i pochodnej w przemyśle w Polsce wynosiło 4320,5 PJ, z czego 40,4% tej energii wyprodukowano ze spalania węgla kamiennego a 14% z węgla brunatnego.

W 2014r. w Polsce 81% energii elektrycznej produkowanej było z węgla a udział pozostałych nośników był niewielki. W 2014r wyprodukowano 3835,8 tys.t. popiołów lotnych z węgla, z czego 128,8 tys.t poddano odzyskowi a unieszkodliwiono 134,8 tys.t w tym 2,1 tys.t poddano składowaniu. Tymcza-

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Aleksandra Ściubidło, Politechnika Częstochowska, Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, ul. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, tel. 343250933, asciubidlo@is.pcz.czest.pl

<sup>2</sup> Przemysław Ściubidło, Politechnika Częstochowska, Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, ul. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, psciubidlo@gmail.com

sowo zmagazynowanych zostało 3520,6 tys. t. popiołów lotnych a 51,6 tys. t przekazano innym odbiorcom. Natomiast odpady składowane (stan na koniec roku 2014) na terenach zakładów były na poziomie 26861,4 tys t. [1]

## 2. Wykorzystanie popiołów lotnych w inżynierii środowiska

Popiół lotny będący źródłem krzemu i glinu może być ekonomicznie i przyjaźnie dla środowiska wykorzystany do syntezy uporządkowanych materiałów mezoporowatych a otrzymane produkty z odpadu energetycznego, jakim są popioły lotne, są coraz szerzej wykorzystywane w przemyśle i inżynierii środowiska, jako adsorbenty, m.in. do oczyszczania gazów odlotowych m.in. z CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> [2-8].

W przypadku zastosowania, jako źródła krzemu popiołu lotnego należy wydobyć krzem (w formie krzemianu sodu) z popiołu. Znane są dwie metody wydobyć krzem, pierwsza z nich polega na uzyskaniu krzemianu sodu poprzez mieszanie popiołu w roztworze wodorotlenku sodu oraz druga polegająca na spiekaniu popiołu z wodorotlenkiem sodu. Druga metoda pozwala na wprowadzenie większej ilości krzemu do roztworu.

Jako pierwsi otrzymali mezoporowate glinokrzemiany z wyciągów z popiołów lotnych H.L.Chang i in. [9] w 1999 roku. Użyli oni do syntezy popiołu lotnego klasy F pochodzącego z Elektrowni w Pensylwanii o zawartości 56% krzemu i 31% glinu. Surfaktantem użytym w procesie syntezy sita MCM-41 był bromek cetylotrimetyloamonowy (CTAB). W pierwszym etapie procesu popiół lotny został zmieszany z NaOH w stosunku wagowym 1: 1,2 a następnie wyta-piany w temperaturze 550°C przez 1 godzinę w przepływie powietrza z szybkością nagrzewania 1°C/min. Po fuzji, zmielony proszek został zmieszany z wodą o stosunku wagowym 0,20. Otrzymany roztwór mieszany był 1 dzień w temperaturze pokojowej i ciśnieniu otoczenia. W roztworze po oddzieleniu od osadu poprzez wirowanie, oznaczono zawartość Si i Al. Następnie 0,755g surfaktantu CTAB zmieszano z 2,265 g wody destylowanej a po rozpuszczeniu dodano 0,5ml 4,96N NH<sub>4</sub>OH i rozcieńczono roztwór dodając 13,85 ml wody. Tak przygotowany roztwór surfaktantu został dodany do 40 ml roztworu otrzymanego z popiołu lotnego - supernatantu i wytrząsany był przez 30 minut. PH roztworu było na poziomie 12,8. Roztwór następnie pozostawał w temperaturze 115°C w różnych czasach, w celu odparowania roztworu. Po przemyciu wodą destylowaną próbki suszono w temperaturze 60-80°C przez 12 godzin a następnie kalcynowano w temperaturze 540°C przez 7 godzin z szybkością nagrzewania 1°C/min.

W 2001 roku P.Kumar i in. [10] przeprowadzili syntezę zarówno sita MCM-41 jak i SBA-15. Do badań użyty został popiół pochodzący z Elektrowni Nanao-Ota, charakteryzujący się 31% zawartością Si oraz 10% zawartością Al. W syntezie sita MCM-41 został użyty ten sam surfaktant, jakiego użył H.L.Chang i in. [9] podobnie jak cały pierwszy etap syntezy tego sita. W przesą-

czy oznaczono zawartości krzemu glinu i sodu, odpowiednio: 11000, 380, 35000ppm. W dalszej kolejności 0,867g CTAB zmieszano z 15 ml H<sub>2</sub>O i 0,75g NH<sub>4</sub>OH aq., do którego dodano 38ml supernatantu-przesącza. Dla zapewnienia hydrotermalnych warunków procesu roztwór pozostawał przez 4 dni w temperaturze 97 °C. PH roztworu regulowano w celu utrzymania wartości 10,2 kwasem octowym. W celu otrzymania sita Al-MCM-41 do roztworu dodano trimetyloaluminium [Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>]. Otrzymany materiał po umyciu i wysuszeniu, kalcynowano w temperaturze 550 °C przez 8 godzin.

Do syntezy sita SBA-15 jako surfaktantu użyto trójblokowego kopolimeru EO<sub>20</sub>PO<sub>70</sub>EO<sub>20</sub>. 3,6g kopolimeru rozpuszczono w 150ml 2M HCl a następnie podczas mieszania dodano 40 ml przesącza zawierającego 6,4 g krzemianu sodu Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Do tak przygotowanego roztworu dodano szybko 10ml stężonego HCl i 50 ml H<sub>2</sub>O, po czym roztwór pozostawał w temperaturze pokojowej przez 1 dzień. Po tym okresie temperatura została podniesiona do 90 °C a próbkę pozostawiono w tych warunkach przez 3 dni. Otrzymane próbki były kalcynowane w temperaturze 550 °C przez 6 godzin.

W 2006 roku K.S.Hui i in. [11] użył popiołu lotnego po wstępnej obróbce termicznej w temperaturze 120°C przez 30 minut o następującym składzie chemicznym: 17,8 %Si, 10,4%Al. W przeciwieństwie do poprzednich metod Hui użył roztwory wodorotlenku sodu. Zmieszał 30g popiołu lotnego z 300ml 2M NaOH i wytrząsał przez 4,5 godziny w temperaturze 100°C. W przesączonych roztworach oznaczono zawartość Si, Al odpowiednio: 5470 i 518mg/l. W dalszej części badań, w temperaturze 85°C do 82 ml roztworu supernatantu dodano 1 g CTAB, podczas dalszego mieszania dodano 3,1 ml octanu etylu. Po 10 minutach temperaturę ochłodzono do temperatury pokojowej. Do 10 ml tak przygotowanego roztworu dodano 5.25N kwas siarkowy VI w celu regulacji pH a próbki pozostały w temperaturze pokojowej jeszcze przez 24 godziny. Otrzymany materiał po przemyciu wodą destylowaną i wysuszeniu w 100°C przez 2 godziny kalcynowany był w 550°C przez 4 godziny z szybkością nagrzewania 1°C/min.

W 2007 roku M.Halina i in. [12,13] po zmieleniu popiołu lotnego wybrał do syntezy ziarna o frakcji poniżej 200µm i wysuszone w temperaturze 373K w atmosferze powietrza. Wykorzystując metodę przedstawioną przez Kumara [10] otrzymano przesącze, w których oznaczono Si, Al. odpowiednio: 10000 i 367 ppm. W drugiej części syntezy dokonano jednak pewnej modyfikacji. Surfaktant CTAB rozpuszczono w wodzie z etanolem w stosunku 1: 1 a następnie standardowo dodano amoniaku. Proces syntezy sita był tak prowadzony, aby stosunek molowy w żelu wyniósł (SiO<sub>2</sub>:CTAB:H<sub>2</sub>O) = (1:0,15:170). Tak otrzymany roztwór był kilka godzin wytrząsany w temperaturze pokojowej. Autorzy w trzech próbkach ustawili różne pH wynoszące odpowiednio: 7, 10 i 13. Po filtracji, myciu i wysuszeniu w temperaturze 373K przez 12 godzin, próbki zostały wykalcynowane w temperaturze 823K w atmosferze powietrza przez 6 godzin.

Używając popiołu, jako źródła krzemu i glinu podjęto próby syntezy również sita SBA-16. W 2008 roku próbę taką podjął G.Chandrasekar i in. [14]. Przesącze zawierające wyciągi krzemu i glinu zostały przygotowane zgodnie z procedurą Kumara [10]. Jako surfaktantu użyto trójblokowego polimeru o wzorze (EO106PO70EO106) o nazwie Pluronic F127. Synteza sita przebiegała w sposób następujący: 4g surfaktantu rozpuszczono 150g 2M HCl i wytrząsano przez 4 godziny w temperaturze 40°C, po czym dodano 12 g butanolu i kontynuowano wytrząsanie jeszcze przez godzinę. W celu poprawy struktury autorzy do roztworu dodano 1-2 g krzemianu sodu. Do tak przygotowanego roztworu po dodaniu 12g stężonego HCl i 50 ml wody, roztwór mieszano przez 24 godziny w temperaturze 40°C. Następnie roztwory pozostawały w temperaturze 100°C przez 72 godziny. Po przesączeniu osady przemyto wodą, wysuszono i wykalcynowano w temperaturze 550°C przez 24 godziny.

W następnej publikacji [15] autorzy Ci przedstawili syntezę sit MCM-41, SBA-15 i SBA-16 z użyciem popiołów dennych. Do badań wybrane zostały frakcje popiołów lotnych poniżej 200  $\mu\text{m}$  a wyciągi z popiołów zostały przygotowane w taki sam sposób jak w przypadku popiołów lotnych. Synteza MCM-41 przebiegała w sposób następujący: 1,2 g CTAB rozpuszczono w 15 g  $\text{H}_2\text{O}$  i 1g  $\text{NH}_4\text{OH}$  i mieszano przez 30 minut a po tym czasie do roztworu dodany został przesącz z popiołów dennych i kontynuowano mieszanie przez kolejne 2 godziny. Po wyregulowaniu pH na 10 przy użyciu kwasu octowego, roztwory pozostawiono w autoklawie przez 48 godzin w temperaturze 100 °C. W przypadku syntezy sita SBA-15 autorzy przeprowadzili syntezę wykorzystując popiół denny zgodnie z procedura podaną przez Kumara [9] przy użyciu roztworów z popiołów lotnych. Natomiast wykorzystując procedurę syntezy sita SBA-16 przeprowadzoną przez G.Chandrasekar [14] otrzymali SBA-16 wykorzystując popiół denny.

Kolejna publikacja tego autora [16] dotyczy syntezy sorbentów z popiołów lotnych pod kątem ich wykorzystania w procesie adsorpcji  $\text{CO}_2$ . Po otrzymaniu sita SBA-15 zgodnie z procedurą przedstawioną we wcześniejszej publikacji autora [15], zostało zmodyfikowane poprzez impregnację iminami. W tym celu 1g wykalcynowanego sita rozpuszczono w przygotowanym wcześniej roztworze, w którym zmieszano 1g PEI( polietylenoiminy) z 8 g metanolu. Roztwór ten następnie mieszano przez 30 minut i suszono w temperaturze 70 °C przez 16 godzin pod zmniejszonym ciśnieniem. Opisane badania stanowią punkt wyjścia dla późniejszych prac prowadzonych w zakresie syntezy materiałów mezoporowatych z popiołów lotnych.

### 3. Wykorzystanie popiołów lotnych w Polsce

Dotychczasowe badania w Polsce dotyczyły syntezy zeolitów z popiołów lotnych [17-24] oraz możliwości ich wykorzystania w procesie adsorpcji dwutlenku węgla [25-28]. Poza zeolitami prowadzone były prace nad syntezą mate-

riałów mezoporowatych z popiołów lotnych [29-35] oraz możliwości ich wykorzystania w energetyce [35-37]. Do syntez materiałów mezoporowatych wykorzystywane były zarówno popioły lotne pochodzące z kotłów pyłowych jak i popioły pochodzące ze spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej.

Wspomniani autorzy [4] do syntezy materiału mezoporowatego MCM-41 użyli popiołu, który charakteryzował się 51,39% zawartością  $\text{SiO}_2$  oraz 24,9% zawartością  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jak również 4,35% zawartością wapnia. Zgodnie z klasyfikacją wg normy BN-79/6722-09 popiół ten został sklasyfikowany jako popiół krzemionkowy.

W pierwszym etapie syntezy autorzy przygotowali wyciąg z popiołu lotnego. W tym celu popiół zmieszano z NaOH tak aby stosunek wagowy pozostał na poziomie 1:1,2, po czym mieszaninę mielono przez 2 godziny a następnie próbkę poddawano obróbce termicznej w 823K przez 1 godzinę z szybkością nagrzewania 1K/min. Po ochłodzeniu do temp. pokojowej powtórnie materiał zmielono i zmieszano z wodą w stosunku wagowym 1: 4 by w dalszej kolejności próbkę wytrząsać w temp. pokojowej przez 12 godzin. Próbka następnie została przefiltrowana.

W przygotowanym roztworze zawartość krzemu wynosiła  $1,96 \times 10^3$  mg/l a glinu  $8,4 \times 10^2$  mg/l. Następnie do tak przygotowanego wyciągu roztworu krzemu dodano roztwór surfaktantu-matrycy. W tym celu CTAB rozpuszczono w wodzie destylowanej i dodano  $\text{NH}_4\text{OH}$  po czym dodano do supernatantu (wyciągu krzemu) tak, aby stosunek molowy w żelu wyniósł  $\text{SiO}_2:\text{CTAB}:\text{H}_2\text{O} = 1:0,15:170$ . PH roztworu nastawiono na 11 przy użyciu  $\text{CH}_3\text{COOH}$  i podczas ogrzewania w temp. 373K przez 4 dni regulowano kilkakrotnie pH. Wykryształowaną próbkę następnie przefiltrowano, umyto przy użyciu wody destylowanej, aby usunąć nadmiar NaOH i wysuszono w temp. 373K przez 24h. W celu usunięcia matrycy próbkę poddano kalcynacji w temp. 823K przez 2 godziny z szybkością nagrzewania 1 K/min.

W kolejnej publikacji Ci sami autorzy [5] przeprowadzili syntezę sita SBA-15, do syntezy którego jako surfaktantu użyto trójblokowego kopolimeru  $\text{EO}_{20}\text{PO}_{70}\text{EO}_{20}$ . Kopolimer o masie 3,6g rozpuszczono w 150ml 2M HCl a następnie podczas mieszania dodano 200 ml przesącza z popiołów lotnych uzyskanych podobnie jak przy syntezie sit MCM-41. Tak przygotowany roztwór pozostawał w temperaturze 90 °C pokojowej przez 96 godzin. Po tym czasie próbki przefiltrowano, przemyto wodą i suszono w temp 100 °C przez 8 godzin. Następnie otrzymane próbki były kalcynowane w temperaturze 550 °C przez 6 godzin.

#### 4. Podsumowanie

Popiół lotny pochodzący ze spalania paliw stałych ze względu na znaczne zawartości krzemu i glinu, jest odpowiednim materiałem do syntezy sit mezoporowatych. Synteza sit mezoporowatych z popiołów lotnych umożliwia zagospo-

darowanie popiołów. Modyfikacja popiołów w materiały mezoporowate pozwala na otrzymanie cennych sorbentów z odpadów energetycznych, jakim są popioły lotne oraz ich ponowne wykorzystanie w energetyce i inżynierii środowiska, jako adsorbenty, m.in. do oczyszczania gazów odlotowych m.in. z CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>.

*Badania sfinansowano przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC-2011/03/B/ST8/05916.*

## Literatura

- [1] GUS.
- [2] X.Xu, C.Song, R.Wincek, J.M.Andresen, B.G.Miller, W.Scaroni, 2003. Separation of CO<sub>2</sub> from power plant flue gas using a novel CO<sub>2</sub> "molecular basket" adsorbent. *In: Prepr. Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem.* 48, pp. 162-163.
- [3] Fateme Rezaei, Ali A. Rownaghi, Saman Monjezi, Ryan P. Lively, and Christopher W. Jones, SO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> Removal from Flue Gas Streams by Solid Adsorbents: A Review of Current Challenges and Future Directions, *Energy Fuels*, 2015, 29 (9), pp. 5467-5486.
- [4] A. Ściubidło, W. Nowak, Novel sorbents for flue gas purification, *Journal of Power Technologies* 92,(2),(2012), pp. 115-126.
- [5] A. Ściubidło, W. Nowak Doczyszczanie spalin z tlenków azotu przy użyciu sorbentów z popiołów lotnych, *Polska Inżynieria Środowiska Prace*. Pod red. Marzenna Dudzińska, Artur Pawłowski. T.1, s. 299-305, Lublin, 2012.
- [6] I. Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak Fly Ash-Based Sorbents for Post-Combustion Capture CO<sub>2</sub>. *International Conference EuroCoalAsh. Monograph*. Ed. Tomasz Szczygielski. Warsaw, 2008, s. 101-110.
- [7] I.Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak Mezoporowate materiały z popiołów lotnych do separacji dwutlenku węgla ze spalin, *Popioły z energetyki. Monografia*. Red. Tomasz Szczygielski, s. 85-94, Szczecin, 2007.
- [8] W. Nowak, A. Ściubidło, Synteza mezoporowatego sita MCM-41 z popiołów lotnych do usuwania tlenków azotu, *XVI Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki*, 21-24 październik 2009, Zakopane, s. 371-383.
- [9] H.L. Chang, C.M. Chun, I. A. Aksay, W. H. Shih, Conversion of Fly Ash into Mesoporous Aluminosilicate, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, 38 (3), pp. 973-977.
- [10] P. Kumar, N. Mal, Y. Oumi, K. Yamanaa, T. Sano, Mesoporous materials prepared using coal fly ash as the silicon and aluminium source, *J. Mater. Chem.*, 2001, 11, pp. 3285-3290.
- [11] K. S. Hui, C. Y. Chao, Synthesis of MCM-41 from coal fly ash by a green approach: influence of synthesis pH, *J Hazard Mater.* 2006 Sep 21;137(2), pp. 1135-48.
- [12] M. Halina, S. Ramesh, M. A. Yarmo, R. A. Kamarudin, Non-hydrothermal synthesis of mesoporous materials using sodium silicate from coal fly Ash, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 101, Issues 2-3, 2007, pp. 344-351.
- [13] M. Halina, C. Ramesh, B. Shahida, A. Y. Mohd., Processing of mesoporous silica materials (MCM-41) from coal fly ash, *Journal of Materials Processing Technology* Volume 186, Issues 1-3, 2007, pp. 8-13.
- [14] Ch. Govindasamy, W. S. Ahn, Synthesis of cubic mesoporous silica and carbon using fly Ash, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Volume 354, Issue 33, 2008, pp. 4027-4030.



- [15] Ch. Govindasamy, K.S. You, J.W. Ahn, W.S. Ahn, Synthesis of hexagonal and cubic mesoporous silica using power plant bottom ash, *Microporous and Mesoporous Materials*, Volume 111, Issues 1-3, 2008, pp. 455-462.
- [16] Ch. Govindasamy, W. J. Son, W. S. Ahn, Synthesis of mesoporous materials SBA-15 and CMK-3 from fly ash and their application for CO<sub>2</sub> adsorption, *Journal of Porous Materials*, Volume 16, Number 5, 2008.
- [17] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak „Zeolity syntetyzowane z popiołów lotnych” – Fluidalne Spalanie Paliw w Energetyce, *Materiały Konferencyjne*, 2004, s. 207-217.
- [18] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak „Modyfikacja popiołów lotnych w materiałach zeolitowych” – XI Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki, *Materiały Konferencyjne Zakopane*, 2004, s. 157-173.
- [19] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak „Application of model-free kinetics to the study of dehydration of fly ash-based zeolite” – *Thermochemica Acta* 413 (2004), pp. 23-29.
- [20] D. Bukalak, I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska, Wpływa zawartości Si i Al w popiele lotnym na tworzenie się frakcji zeolitowych typu Na-P1, *Materiały Konferencyjne*, Lublin 2009, s. 35-47.
- [21] D. Sztekler, I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska, Analiza własności chemicznych popiołów lotnych pod kątem syntezy zeolitu Na-A, *Materiały Konferencyjne*, Lublin 2009, s. 316-320.
- [22] A. Ściubidło, I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska, Wpływ składu chemicznego popiołów lotnych na efektywność procesu syntezy zeolitów Na-X, *Materiały Konferencyjne*, Lublin 2009, s. 225-237.
- [23] A. Ściubidło, W. Nowak, I. Majchrzak-Kucęba, 26th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Characterization of zeolites from polish fly ashes, *Materiały Konferencyjne*, Pittsburgh, 20-23 September 2009.
- [24] I. Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak, 26th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Studies on the properties of mesoporous materials derived from polish fly ashes, *Materiały Konferencyjne*, Pittsburgh, 20-23 September 2009.
- [25] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak „Properties of Zeolites Synthesized From Fly Ashes and Their Potential Application to CO<sub>2</sub> Removal from Flue Gas” – Twenty-First Annual International Pittsburgh Coal Conference-Coal-Energy and the Environment, 2004.
- [26] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak „Studies of CO<sub>2</sub> removal from flue gases using ash – based Zeolites” - 8th International Conference on Circulating Fluidized Bed Technology VIII, Hangzhou, China, May 10-13, 2005, s. 748-754.
- [27] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, A. Ściubidło, EuroCoalAsh, Sorbenty na bazie popiołów lotnych do wychwytywania CO<sub>2</sub> po procesie spalania, *Materiały Konferencyjne*, Warszawa 2008, s. 101-110.
- [28] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Development of Fly Ash-Based Sorbent To Capture CO<sub>2</sub> From Flue Gas, 2009, pp. 596-603.
- [29] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, P. Sil-Ibek, B. Kucharska „Mezoporowate sita molekularne z popiołów lotnych” – Fluidalne Spalanie Paliw w Energetyce, *Materiały Konferencyjne*, Politechnika Częstochowska 2005, s. 171-179.
- [30] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak „Modyfikacja popiołów lotnych w mezoporowate materiały” VII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, *Materiały Konferencyjne* 2005, s. 309-318.

- [31] A. Ściubidło, I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, EuroCoalAsh, Zagospodarowanie popiołów lotnych z polskich elektrowni i elektrociepłowni poprzez modyfikację popiołów w materiały mezoporowate, 2008, s. 163-180.
- [32] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, 9th International Conference on Circulating Fluidized Beds in conjunction with the 4th International VGB Workshop Operating Experience with Fluidized Bed Firing Systems”, “Synthesis and characterization of mesoporous materials from CFB-fly ash”, Materiały Konferencyjne Hamburg, 2008 pp. 875-880.
- [33] I. Majchrzak-Kucęba, W. Nowak, XVI Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki, Modyfikacja popiołów lotnych w sorbenty i nanomateriały-doświadczenia laboratoryjne, Materiały Konferencyjne, Zakopane 2009, s. 217-225.
- [34] A. Ściubidło, W. Nowak, XVI Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki, Synteza mezoporowatego sita MCM-41 z popiołów lotnych do usuwania tlenków azotu, Materiały Konferencyjne, Zakopane 2009, s. 371-383.
- [35] W. Nowak, I. Majchrzak-Kucęba, XVI Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki, Sorbenty z popiołów lotnych dla energetyki, Materiały Konferencyjne, Zakopane 2009, s. 385-392.
- [36] X.Xu, C. Song, R.Wincek, J.M.Andresen, B.G. Miller, A.W.Scaroni, 2003. Separation of CO<sub>2</sub> from power plant flue gas using a novel CO<sub>2</sub> "molecular basket" adsorbent. In: Prepr. Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem. 48, pp. 162-163.
- [37] L.L. Sloss, Nitrogen Oxides Control Technology Fact Book, USA, 1992.

## UTILIZATION OF FLY ASH IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

### Summary

Synthesis of sorbent from fly ash is one of the methods of utilization fly ash. Fly ash is a source of silicon and aluminium can be economically and environmental-friendly sorbents- used for the synthesis of zeolites. The products obtained from waste energy are increasingly used in industry and environmental engineering, as adsorbents for flue gas cleaning from the CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>. Silicon is extracted from fly ash in the form of sodium silicate. There are two methods of silicon extraction. In the first method, sodium silicate is obtained by mixing fly ash with sodium hydroxide solution.

The second method is sintering of fly ash with sodium hydroxide and allows for more silicon to be added to the solution. The paper presents the research on the synthesis of mesoporous molecular sieves MCM-41 and SBA-15.

**Keywords:** fly ash, mesoporous molecular sieve, SBA-15, MCM-41

*Przesłano do redakcji: 24.11.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Dariusz SZWARKOWSKI<sup>1</sup>

## WPŁYW WYKONANIA GŁĘBOKIEGO WYKOPU POD BUDYNEK WYSOKI MOGILSKA TOWER W KRAKOWIE NA ISTNIEJĄCĄ ZABUDOWĘ W UJĘCIU MODELU PRZESTRZENNEGO OPARTEGO NA METODZIE ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH (MES)

Artykuł przedstawia kompleksowe podejście przy modelowaniu technologii zabezpieczenia głębokiego wykopu ścianką szczelną, typu Larsen budynku wysokiego Mogilska Tower w Krakowie. Budynek jako jeden z nielicznych, będzie posiadał trzy kondygnacje podziemne. Projektowanie i wykonanie głębokich wykopów wraz z wykonaniem ich zabezpieczenia jest zagadnieniem trudnym, wymagającym od projektanta szerokiej wiedzy z dziedziny geotechniki. Poprawne zaprojektowanie konstrukcji oraz zabezpieczenia wykopu wymaga znajomości zagadnień interakcji konstrukcji z podłożem gruntowym jak i wiedzy z zakresu przyjętej technologii obudowy wykopu. Wykonanie budynków wysokich z kondygnacjami podziemnymi w sąsiedztwie istniejących zabudowy wiąże się z koniecznością oceny wpływu wykonania głębokiego wykopu na obiekty narażone na nierównomierne osiadania. Instrukcja ITB dotycząca zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów podkreśla wykonanie oceny wpływu głębokich wykopów na osiadania sąsiednich budynków przy metodzie uproszczonej lub szczegółowej opartej na metodzie elementów skończonych (MES). W artykule zaprezentowano rezultaty z modelowania numerycznego zabezpieczenia głębokiego wykopu ścianką szczelną typu Larsen. Uwzględniono przestrzenny układ warstw geotechnicznych. Założono przestrzenny stan naprężenia i odkształcenia modelu. Przyjęto etapy wykonania głębokiego wykopu. Wyniki obliczeń porównano z przemieszczeniami uzyskanymi z pomiarów geodezyjnych i otrzymanych naziemnym skanowaniem laserowym. Określono zasięg i wpływ głębokiego wykopu na osiadanie sąsiednich obiektów.

**Słowa kluczowe:** skaner laserowy, osiadania budowli, roboty ziemne, analiza numeryczna

### 1. Wprowadzenie

Budynki wysokie to obiekty budowlane o wysokości od 25 do 55 m [1]. Na terenach silnie zurbanizowanych, projektowanie budynków wysokich jest zabiegiem koniecznym i kosztownym. Ze względu na wysokie ceny działek budowlanych, coraz częściej inwestorzy decydują się na budynki wysokie. Wynika to rów-

<sup>1</sup> Dariusz Szwarkowski, Politechnika Krakowska, Katedra Współdziałania Budowli z Podłożem, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; tel. 12-628-25-66; dszwarkowski@pk.edu.pl

niez z miejscowego planu zagospodarowania terenu. Na terenach miejskich, istnieją problemy z niewystarczającą ilością miejsc parkingowych. Konieczne jest zatem projektowanie budynków uwzględniających potrzeby mieszkańców. Wiąże się to z dodatkowymi kosztami realizacji kondygnacji podziemnych, przeznaczonych na miejsca postojowe. Wykonanie kondygnacji podziemnych, na terenach z gęsto sąsiadującą ze sobą zabudową wymaga stosowania zabezpieczeń wykopów głębokich w postaci ścianek szczelnych czy ścian szczelinowych. Bliskość sąsiedztwa głębokich wykopów, o głębokości powyżej 3 m [2] ma wpływ na przemieszczenia podłoża gruntowego w pobliżu sąsiadujących z wykopem budynków. Realizacja głębokich wykopów wymaga prowadzenia na każdym etapie pogłębiania wykopu, monitoringu geodezyjnego czy monitoringu za pomocą naziemnego skaningu laserowego, deformacji podłoża [3]. Niewielkie sztywności obudów wykopów ścianek szczelnych czy ścian szczelinowych wymagają również stosowania rozpór poziomych. Projektowanie zabezpieczeń wykopów wymaga szerokiej wiedzy z zakresu geotechniki oraz znajomości zagadnień związanych z interakcją konstrukcji z podłożem gruntowym. Determinuje to konieczność stosowania programów numerycznych, umożliwiających uwzględnienie szeregu zmiennych w projektowaniu konstrukcji. Obecnie w projektowaniu zabezpieczeń wykopów, powszechnie stosuje się analizy numeryczne oparte na płaskim stanie odkształcenia. Rozpatrywane modele nie uwzględniają przestrzennej pracy konstrukcji obudowy wykopu jak i również przestrzennego charakteru przebiegu warstw geotechnicznych. W przypadku niewielkich wymiarów rzutu wykopu, układ warstw geotechnicznych na terenach płaskich nie ulega znacznym zmianom. Jednak w przypadku głębokich wykopów o znacznym rzucie poziomym, nie uwzględnienie przestrzennego przebiegu warstw geotechnicznych spowodować może błędy już na etapie projektowania przyjętych założeń zabezpieczenia ścian wykopów. W artykule skupiono się na przedstawieniu wpływu wykonania głębokiego wykopu, o głębokości 10 m, na sąsiednią zabudowę. W modelowaniu uwzględniono przestrzenny charakter terenu oraz zmian przebiegu warstw geotechnicznych. Przyjęto technologię obudowy wykopu w postaci ścianek szczelnych typu Larssen, wzmocnionych opaskami stalowymi z kształtowników HP320, walcowanymi na gorąco. Na podstawie analizy numerycznej w przestrzennym stanie naprężenia i odkształcenia modelu, dla poszczególnych etapów realizacji inwestycji, wyznaczono przemieszczenia pionowe i poziome podłoża gruntowego. Uzyskane wyniki posłużyły do określenia maksymalnych przemieszczeń w pobliżu obiektu zlokalizowanego w sąsiedztwie głębokiego wykopu. Umożliwiło to ocenę zagrożenie obiektu na skutek ewentualnego przekroczenia dopuszczalnych deformacji podłoża, określonych w ITB [4] i w normie [5].

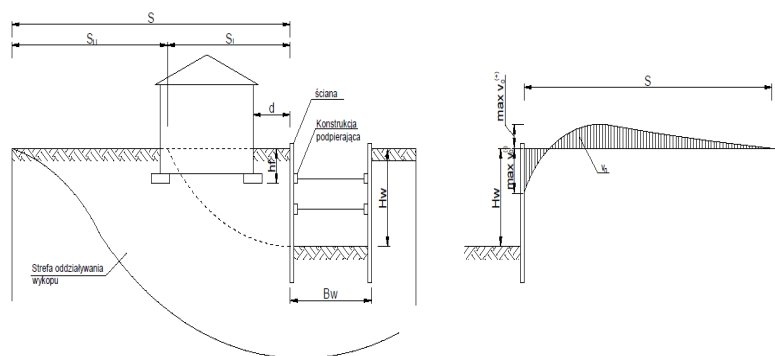
## 2. Wpływ głębokiego wykopu na budynki sąsiednie

Ze względu na obecnie często stosowaną praktykę projektowania i wykonywania budynków wysokich w sąsiedztwie istniejącej zabudowy, należy określić wpływ powstającego obiektu na sąsiadującą z nim zabudowę. Istotne jest określe-

nie maksymalnych przemieszczeń pionowych i poziomych, które spowodują negatywne oddziaływania na istniejące budynki. Zgodnie z zaleceniami ITB [4], przy ocenie wpływu głębokich wykopów na przemieszczenia sąsiednich budynków, istotne jest określenie strefy oddziaływania zasięgu głębokich wykopów na istniejącą zabudowę. Jest to obszar, gdzie wystąpią pionowe i poziome przemieszczenia gruntu, ze względu na realizowany wykop [4]. Można pominąć przy projektowaniu technologii wykonania ścianek obudów wykopów, wpływ głębokiego wykopu na osiadania budynków sąsiednich, jeśli odległość budynków od obudowy wykopu jest nie mniejsza niż podana we wzorze (1). Na rys. 1 przedstawiono zakres strefy wpływów głębokiego wykopu na sąsiednią zabudowę [4], [2].

$$d_{\min} > \beta H_w \tag{1}$$

gdzie:  $d_{\min}$  – minimalna odległość istniejącej zabudowy od krawędzi wykopu [m];  
 $\beta$  – współczynnik zależny od zabiegów obniżających poziom zwierciadła wód podziemnych, ( $\beta = 5$ , dla zabiegów obniżających poziom wodonośny,  $\beta = 4$  jeśli nie przewiduje się wymienionych czynności);  
 $H_w$  – głębokość wykopu [m].

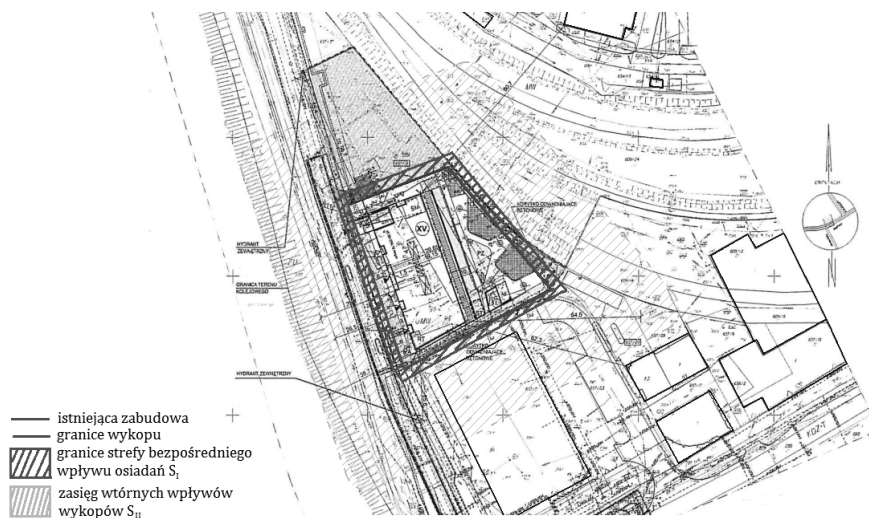


Rys. 1. Oznaczenia parametrów głębokiego wykopu i stref jego oddziaływania  $H_w$ ,  $B_w$  – wymiary wykopu,  $S$  – zasięg strefy oddziaływania wykopu,  $S_I$  – zasięg strefy bezpośredniego oddziaływania wykopu,  $S_{II}$  – zasięg wpływów wykopów wtórnych,  $d$  – odległość od obudowy,  $h_r$  – głębokość posadowienia budynku,  $\max v_0(-)$  – maksymalna wartość przemieszczeń ujemnych,  $\max v_0(+)$  – maksymalna wartość przemieszczeń dodatnich (wypiętrzeń), opracowanie własne na podstawie [4]

Fig. 1. Determination of parameters of deep excavation and its impact zones  $H_w$ ,  $B_w$  – excavation dimensions,  $S$  – range of excavation impact zone,  $S_I$  – range of the direct impact zone of the excavation,  $S_{II}$  – range of secondary excavation impacts,  $d$  – distance from trench casing,  $h_r$  – depth of building foundation,  $\max v_0(-)$  – maximum negative displacement values,  $\max v_0(+)$  – maximum positive displacement, own elaboration based on [4]

W artykule przedstawiono koncepcję wykonania głębokiego wykopu w technologii ścianki szczelnej, zabezpieczonej brusami stalowymi typu Larssen. Analizie poddano rzeczywisty wykop, realizowany pod projektowany budynek „Mogilska Tower”, w Krakowie. Projektowany budynek będzie wyposażony w trzy kondygnacje podziemne oraz 14 kondygnacji nadziemnych. Przewidywana wysokość obiektu wyniesie 45 m. Wiosną 2016 r. rozpoczęły się prace związane z wykonaniem I etapu wykopu wraz z wbiciem stalowych brusów. Ze względu na projek-

towaną głębokość wykopu, równą 10 m p.p.t., w artykule podjęto próbę oceny jego wpływu na sąsiednią zabudowę. Bezpośrednio w pobliżu wykopu zlokalizowany jest budynek handlowo-usługowy. Odległość elewacji północnej obiektu od krawędzi dna wykopu wynosi 7 m i jest mniejsza niż wartość określona z warunku (1) (50 m). Budynek charakteryzuje się jednolitą bryłą w kształcie prostopadłościanu. Wykonany jest w technologii tradycyjnej ze ścianami zewnętrznymi z pustaków. Posiada dach jednospadowy, o konstrukcji z dźwigarów prefabrykowanych drewnianych. Ze względu na bezpośrednie sąsiedztwo obiektu z planowaną inwestycją, niezbędne jest prowadzenie stałego monitoringu przemieszczeń podłoża gruntowego w sąsiedztwie budynku, na każdym etapie realizacji wykopu. Ocenę wpływu planowanego wykopu wyznaczono metodą uproszczoną, w oparciu o zalecenia podane w standardzie ITB [4], na podstawie projektowanego zasięgu stref oddziaływania wykopu  $S_{II}$  i zasięgu bezpośrednich oddziaływań  $S_I$ . Zasięg stref przedstawiono na rys. 2.

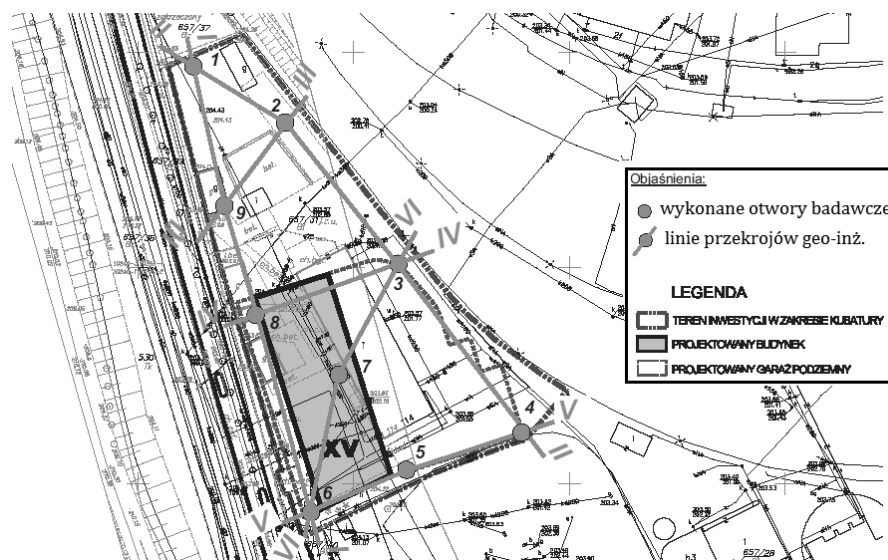


Rys. 2. Plan zagospodarowania terenu z zaznaczonymi strefami wpływu głębokiego wykopu, opracowanie własne na podstawie [7]

Fig. 2. Development plan with marked zones of influence of deep excavation, own elaboration based on [7]

### 3. Charakterystyka geologiczno-inżynierska obszaru badań

W analizie numerycznej wykonania ścianki szczelnej uwzględniono przestrzenny układ warstw geotechnicznych wraz z przestrzenną rzeźbą terenu w sąsiedztwie planowanego wykopu. Przestrzenny układ warstw geotechnicznych sporządzono na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [6], [7], rys. 3. Przyjęto liniową zmianę miąższości warstw geotechnicznych pomiędzy otworami badawczymi.



Rys. 3. Plan zagospodarowania terenu z zaznaczonymi strefami wpływu głębokiego wykopu, opracowanie własne na podstawie [7]

Fig. 3. Land development map with location of research holes, own elaboration based on [7]

Przyjęto, że w podłożu na głębokości 13,3-14,8 m p.p.t. zalegają utwory mioceńskie. Nad nimi znajdują się czwartorzędowe utwory piasków różnych frakcji i żwiry o miąższości 12 m. Nad warstwami czwartorzędownymi zalegają mady rzeczne w postaci glin pylastych, pyłów piaszczystych i piasków gliniastych. Powierzchnia terenu pokryta jest utworami nasypowymi o zróżnicowanej miąższości od 0,5 do 1,6 m. Teren inwestycji charakteryzuje się płaską rzeźbą terenu, położonego na wysokości 203,5-204,5 m. n.p.m.[7]. Na rys. 4 przedstawiono przekrój geologiczno-inżynierski zlokalizowany w ciągu badawczym I-I.

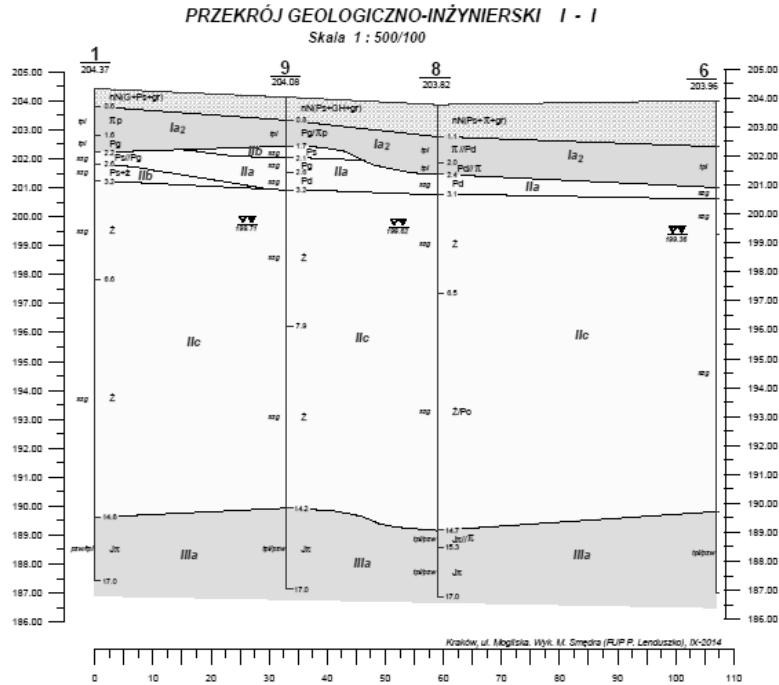
W modelowaniu numerycznym uwzględniono trzy warstwy geotechniczne. Parametry kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$ , kohezji  $c$ , ciężaru objętościowego  $\gamma$ , oraz stopnia plastyczności  $I_L$ , wraz ze stanem zagęszczenia gruntów  $I_D$ , wraz z modułem odkształcenia  $E_0$  i współczynnikiem Poissona  $\nu$ , zestawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Parametry geotechniczne warstw przyjęte w modelowaniu numerycznym (opracowanie własne na podstawie [7])

Table 1. Geotechnical parameters of layers adopted in numerical modeling, own elaboration based on [7]

Lp.	Nazwa gruntu	$\Phi$ [°]	$c$ [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_0$ [MPa]	$\nu^*$	$I_L/I_D$
1.	Ia1 (gliny pylaste)	13,00	13,50	20,50	16,50	0,25	0,30
2.	IIa (piaski drobne i gliniaste)	30,50	0,00	19,00	50,00	0,25	0,55
3.	IIc (żwiry, pospółki)	39,00	0,00	20,50	146,00	0,25	0,55
4.	IIIa (iły trzeciorzędowe)	13,00	60,00	21,50	22,00	0,25	0,00

\*parametry dobrane na podstawie literatury, w założeniach do modelowania numerycznego [8],[9]



Rys. 4. Przekrój geologiczno-inżynierski I-I, na podstawie [7]

Fig. 4. Geological-engineering cross section I-I, based on [7]

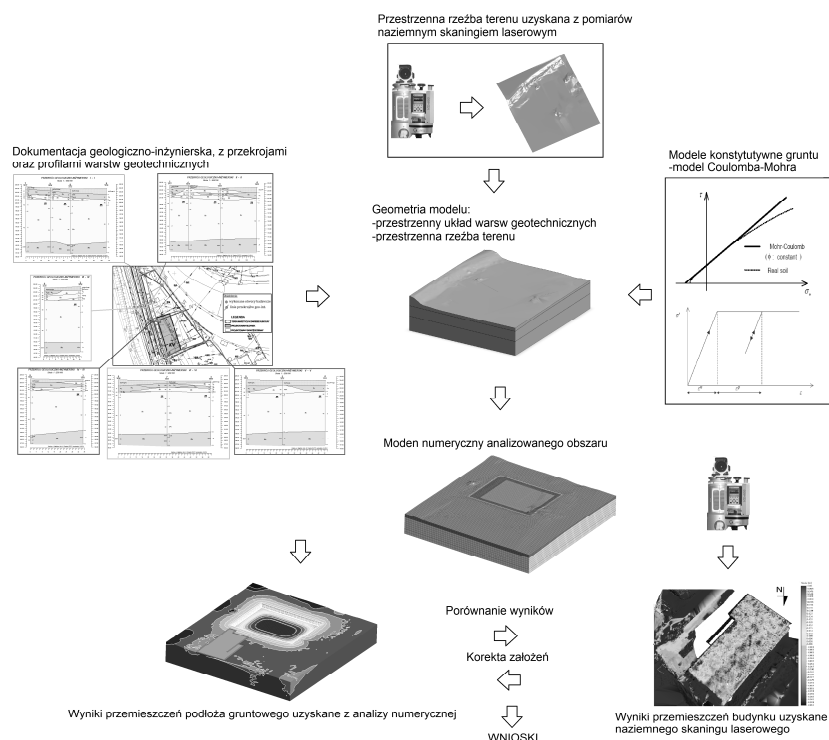
## 4. Metodyka opracowania modelu numerycznego

### 4.1. Model przestrzenny

Model przestrzenny terenu wraz z lokalizacją miejsca wykonania głębokiego wykopu wykonano na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej oraz naziemnego skaningu laserowego. Na rys. 5 przedstawiono procedurę otrzymania modelu numerycznego do analizy wpływu wykonania głębokiego wykopu na sąsiednią zabudowę.

Pomiar naziemnym skanerem laserowym wykonano w trzech punktach pomiarowych, umożliwiających stworzenie powierzchni analizowanego obiektu, narażonego na nierównomierne osiadania [3]. Metoda skanowania powierzchni polegała na wykorzystaniu wysokiej częstotliwości próbkowania, rzędu  $f = 122 \text{ kHz}$  [10].





Rys. 5. Algorytm wyznaczenie wpływu wykonania głębokiego wykopu na osiadania budynku sąsiedniego (opracowanie własne)

Fig. 5. Algorithm to determine the effect of performing a deep excavation on the settlement of a neighboring building, own elaboration

Uzyskane pomiary obszaru, w postaci chmury punktów umożliwiają stworzenie przestrzennego kształtu rzeźby terenu, powstałego z połączenia elementów trójkątnych wygenerowanych z punktów pomiarowych. Powierzchnie terenu, powstałe z dwóch różnych pomiarów przeprowadzonych w ustalonych odstępach czasu, podanych w artykule [3], umożliwiły uzyskanie modelu różnicowego osiadań terenu. Model różnicowy powstaje jako różnica pomiędzy współrzędnymi pionowymi, otrzymanymi z pierwszego skanowania naziemnym skanerem laserowym, ze współzrędnymi stanowiącymi rezultat drugiego pomiaru skanowaniem laserowym.

Metoda badania skanerem laserowym umożliwiła wykonanie precyzyjnego odwzorowania terenu z dokładnością pomiarową 5 mm. Dodatkowo wyniki uzyskane naziemnym skanowaniem laserowym porównano z rezultatami otrzymanymi z reperów geodezyjnych zamontowanych w sąsiedztwie analizowanego obiektu [3]. Osiadania budynku umożliwiły weryfikację przemieszczeń uzyskanych z modelowania numerycznego.

## 4.2. Etapy modelowania

Analizę numeryczną wykonania głębokiego wykopu oraz ocenę jego wpływu na osiadania sąsiedniego budynku przeprowadzono w oparciu o poniższe etapy modelowania:

- Etap I liniowa analiza statyczna, z warunkami początkowymi modelu, przed wykonaniem wykopu,
- Etap II, nieliniowa analiza statyczna, zabicie brusów stalowych na głębokość 16m p.p.t., w warstwie łąk miocenijskich,
- Etap III, nieliniowa analiza statyczna, wykonanie wykopu na głębokość 2m p.p.t., wraz z zamontowaniem oczepu stalowego z kształtowników HP320,
- Etap IV, nieliniowa analiza statyczna, pogłębienie wykopu na głębokość 4m p.p.t., zamontowanie wzmocnienia w postaci opaski stalowej z kształtowników HP320 na głębokości 2m p.p.t.,
- Etap V, nieliniowa analiza statyczna, zwiększenie głębokości wykopu do 6m p.p.t., wzmocnienie brusów opaską z kształtowników HP320 na głębokości 4m p.p.t.,
- Etap VI, nieliniowa analiza statyczna, pogłębienie wykopu do głębokości 8m p.p.t., wraz z zamontowaniem opaski z kształtowników HP 320 na głębokości 6m.p.p.t.,
- Etap VII, nieliniowa analiza statyczna, wykonanie wykopu do głębokości 10m p.p.t., wraz z zamontowaniem opaski z kształtowników HP320 na głębokości 8m p.p.t. ,
- Etap VIII, porównanie przemieszczeń pionowych uzyskanych z modelowania numerycznego z rezultatami otrzymanymi z naziemnego skaningu laserowego, Wydzielone warstwy geotechniczne zamodelowano modelem idealnie sprężysto – plastycznym z liniowym warunkiem plastyczności (Coulomba-Mohra). W modelowaniu numerycznym przyjęto parametry materiałów podane w tab. 2.

Tabela 2. Parametry materiałowe uwzględnione w analizie numerycznej

Table 2. Material parameters included in the numerical analysis

L.p.	Symbol	Model materiału	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\Phi$ [°]	c [kPa]	$\nu^*$	E <sub>0</sub> [MPa]
1.	IaI	Coulomb-Mohr	20,50	13,0	13,5	0,25	16,5
2.	Ia	Coulomb-Mohr	19,0	30,5	0,1	0,25	50,0
3.	Ic	Coulomb-Mohr	20,5	39,0	0,1	0,25	146,0
4.	IIIa	Coulomb-Mohr	21,5	13,0	60,0	0,25	22,0
5.	Larsen	sprężysty	77,8	-	-	0,3	210000
6.	HP320	sprężysty	77,8	-	-	0,3	210000
7.	Kontakt IaI	tarcie Coulomba	-	13,0	8,8	-	-
8.	Kontakt Ia	tarcie Coulomba	-	30,5	0,1	-	-
9.	Kontakt Ic	tarcie Coulomba	-	39,0	0,1	-	-
10.	Kontakt IIIa	tarcie Coulomba	-	13,0	39,0	-	-

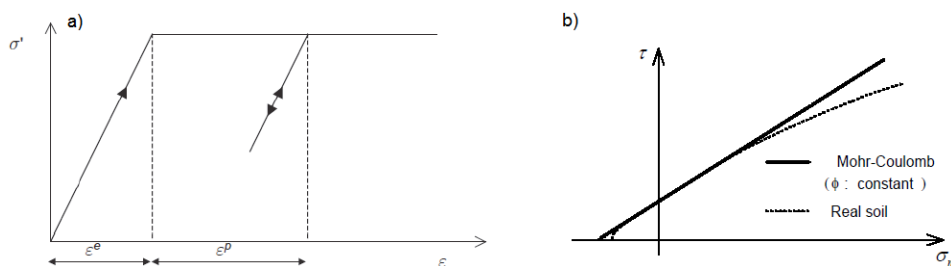
### 4.3. Modele gruntu

Obliczenia numeryczne modelu przeprowadzono w programie numerycznym, bazującym na metodzie elementów skończonych MIDAS GTS NX. Warstwy geotechniczne wykopu, o wymiarach rzutu 70x55m zostały zdyskretyzowane sześciobocznymi elementami skończonymi. Przyjęto wielkość oczka 1 m. Natomiast dla warstw geotechnicznych otaczających granice wykopu, dobrano wielkość oczka 2 m. Brusy stalowe wykopu zamodelowano płaskimi, czworobocznymi elementami skończonymi typu shell, o rozmiarze 1m. Elementy obudowy wykopu, tj. oczep wraz z opaską stalową wykonaną z kształtowników HP320, zamodelowano jednowymiarowymi elementami belkowymi. Przyjęto wielkość oczka siatki równą 1m. Przyjęte rozmiary elementów skończonych wpływają na uproszczenie przebiegu warstw geotechnicznych powstałych na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [7]. Brzegi modelu zablokowano w trzech kierunkach, przyjmując nieprzesuwne warunki brzegowe. Dla bocznych powierzchni modelu, założono swobodę przemieszczeń wyłącznie na kierunku pionowym z. Dla warstw geotechnicznych dobrano model konstytutywny gruntu oparty na założeniach modelu Coulomba-Mohra, z uwzględnieniem właściwości sprężysto-plastycznych gruntu, bez wzmocnienia plastycznego [11],[12]. Kryterium Coulomba-Mohra można zapisać w ujęciu naprężeń głównych jako:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = -\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + c \cos \phi \quad (2)$$

gdzie:  $\sigma_1, \sigma_3$  – naprężenia główne [kPa],  
 $\phi$  – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],  
 $c$  – kohezja [kPa].

Na rys. 6 przedstawiono zależność zmian odkształceń sprężystych ( $\epsilon_s$ ) oraz plastycznych ( $\epsilon_p$ ) w zależności od wartości naprężenia efektywnego przekazywanego na próbkę gruntu w dobranym modelu.



Rys. 6. a) Zależność naprężenia-odkształcenia w modelu sprężysto, idealnie plastycznym, b) Zależność naprężeń normalnych od naprężeń stycznych w gruncie rzeczywistym (real soil) oraz w modelu Coulomba-Mohra (Mohr-Coulomb), na podstawie [12]

Fig. 6. a) strain-strain relationship in elastic, perfectly plastic model, b) the dependence between normal stress and shear stresses in real soil and in the Mohr-Coulomb model, based on [12]

Pomiędzy warstwami geotechnicznymi, a ścianką szczelną zamodelowano elementy kontaktowe wykorzystujące model tarcia Coulomba. Zakłada on że siła tarcia jest proporcjonalna do wielkości uzyskanej z przemnożenia współczynnika tarcia i siły działającej na kierunku stycznym. Kryterium uplastycznienia jest zdefiniowane jako [12]:

$$f = \sqrt{t_t^2 + t_n \tan \phi} - c(\kappa) = 0 \quad (3)$$

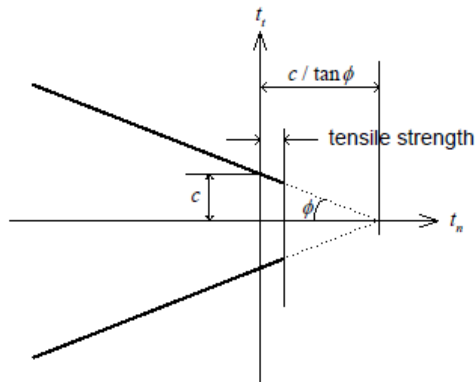
gdzie:  $t_t$  – siła działająca na kierunku stycznym do powierzchni kontaktu [kN],  
 $t_n$  – siła działająca na kierunku normalnym do powierzchni kontaktu [kN],  
 $\phi$  – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],  
 $c$  – kohezja [kPa],  
 $\kappa$  – funkcja względnych przemieszczeń plastycznych.

Na rys. 7 przedstawiono zależność pomiędzy wytrzymałością ośrodka gruntowego na ściskanie i rozciąganie, w ujęciu modelu tarcia Coulomba.

Funkcję względnych przemieszczenia plastycznych ( $\kappa$ ), można wyznaczyć z zależności [12]:

$$\kappa = \Delta u^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial t} \quad g = \sqrt{t_t^2 + t_n \tan \psi} \quad (4)$$

gdzie:  $\psi$  – kąt dylatacji [°],  
 $\lambda$  – mnożnik plastyczny.



Rys. 7. Zależność wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie w modelu tarcia Coulomba w zależności od siły stycznej ( $t_t$ ) i siły normalnej ( $t_n$ ) do powierzchni kontaktu, na podstawie [12]

Fig. 7 The dependence of compressive strength and tensile strength in Coulomb's friction model on the tangential force ( $t_t$ ) and normal force ( $t_n$ ) on the contact surface, on the basis of [12]

Należy zwrócić uwagę, że deformacje pionowe podłoża gruntowego uzyskane na podstawie modelu Coulomba-Mohra, są deformacjami powstałymi wskutek przekroczenia naprężeń dopuszczalnych w gruncie (rys. 6. a). W przeciwnym wypadku przemieszczenia pionowe powstałe w zakresie sprężystym są odwracalne.

## 5. Wyniki analizy

Model numeryczny przeanalizowano pod kątem wpływu deformacji podłoża gruntowego, powstałych w wyniku głębokiego wykopu, na sąsiedni obiekt budowlany. Na rys. 8 przedstawiono zmianę przemieszczeń pionowych w strefie bezpośredniego wpływu osiadań  $S_I$  [4] na sąsiedni budynek (krzywa żółta), jak i również uwzględniono zmianę przemieszczeń pionowych podłoża w strefie  $S_{II}$  wtórnego wpływu wykopu na istniejącą zabudowę (krzywa zielona). Wyniki zestawiono dla punktów, zlokalizowanych w kierunku prostopadłym od granicy wykopu do ścian elewacji budynku.



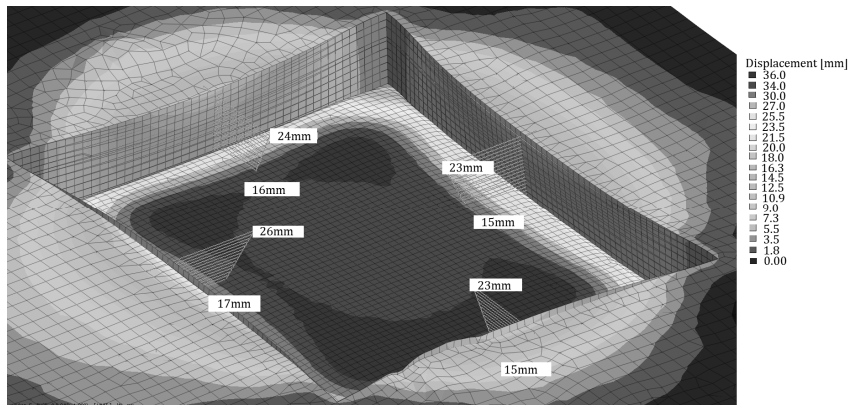
Rys. 8. Przemieszczenia pionowe podłoża gruntowego uzyskane z analizy numerycznej w strefie  $S_I$  i strefie  $S_{II}$ , opracowanie własne

Fig. 8 Vertical ground displacement obtained from numerical analysis in  $S_I$  and  $S_{II}$  zones, own elaboration

Na rys. 9 przedstawiono przemieszczenia całkowite obudowy wykopu wraz z deformacjami podłoża gruntowego w sąsiedztwie wykopu.

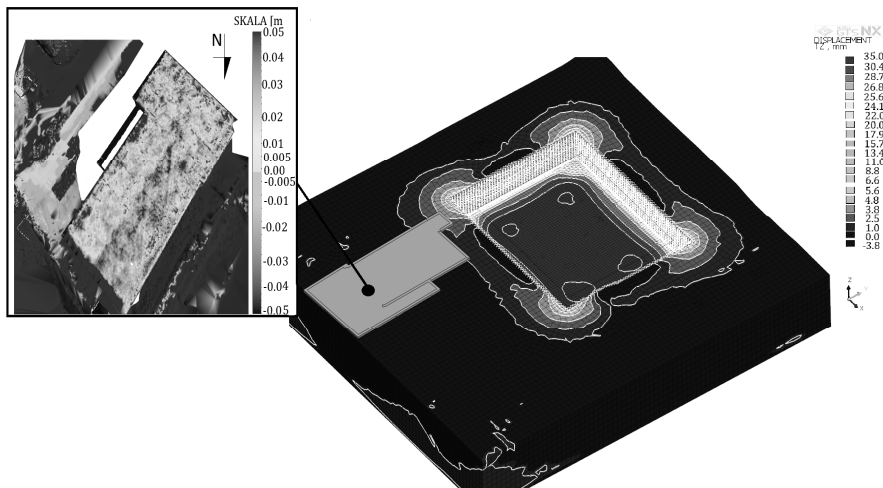
Na rys. 10 porównano wyniki uzyskane naziemnym skanowaniem laserowym z przemieszczeniami pionowymi uzyskanymi w wyniku modelowania numerycznego. Wyniki przemieszczeń pionowych uzyskane dla etapu VIII, wykopu głębokości 10 m p.p.t. są równe 3.8 mm, w sąsiedztwie budynku. Dodatkowo wartości przemieszczeń pionowych uzyskane z pomiarów geodezyjnych wynio-

sły 3 mm [12]. Wartości przemieszczeń pionowych z badań pomiarowych naziemnym skanerem laserowym, z zakresu od 10 do 50 mm, spowodowane są wykonaniem, na powierzchni dachu budynku, dodatkowej warstwy ochronnej, po badaniach pomiarowych.



Rys. 9. Przemieszczenia całkowite obudowy wykopu z deformacjami podłoża gruntowego, opracowanie własne

Fig. 9. Total displacement of the excavation casing with deformation of the subsoil, own elaboration



Rys. 10. Porównanie przemieszczeń pionowych modelu przestrzennego z deformacjami uzyskanymi naziemnym skanerem laserowym, opracowanie własne

Fig. 10. Comparison of vertical displacements of spatial model with deformation obtained by terrestrial laser scanner, own elaboration

## 6. Podsumowanie

Analiza numeryczna umożliwiła ocenę wpływu wykonania głębokiego wykopu na deformacje podłoża gruntowego w sąsiedztwie istniejącego obiektu budowlanego. Uzyskane wartości przemieszczeń pionowych z obliczeń numerycznych modelu przestrzennego, uwzględniającego przestrzenny charakter zmian warstw geotechnicznych i rzeźby terenu, wyniosły 3.8 mm. Są one zbliżone z wartościami pomierzonymi naziemnym skanerem laserowym na elewacji budynku oraz pomiarami geodezyjnymi [3]. Otrzymane rezultaty obliczeń i wyników pomiarów nie przekraczają dopuszczalnych wartości osiadań pionowych dla budynków 1 kondygnacyjnych wynoszących 8cm. Również wartości przemieszczeń w strefie  $S_{II}$  związanej z wtórnym wpływem wykopu na istniejącą zabudowę są nieznacznie większe od wartości podanej w standardzie ITB (5 mm) [4]. Projektowany wykop nie wpłynie negatywnie na pracę konstrukcji obiektu sąsiadującego. W celu oceny dokładniejszego wpływu projektowanego wykopu na sąsiedni obiekt budowlany zaleca się wykonanie dodatkowych badań laboratoryjnych, z wykorzystaniem aparatu edometrycznego, umożliwiającego otrzymanie pełnej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej badanej warstwy geotechnicznej przy zadanych obciążeniach. Umożliwi to dokładniejsze zamodelowanie zachowania się ośrodka gruntowego przy wykorzystaniu plastycznych modeli konstytutywnych gruntu, takich jak np. model Cam-Clay [11].

## Literatura

- [1] Pawłowski A. Z., Cała I.: Budynki wysokie. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [2] Szulborski K., Michalak H., Woźniak M.: Zabezpieczenia i obserwacja obiektów w sąsiedztwie głębokich wykopów. XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektowania Konstrukcji, Wisła, 2009.
- [3] Szwarkowski D., Zięba J.: Monitoring osiadań budynków w sąsiedztwie głębokiego wykopu budynku „Mogilska Tower” w Krakowie, przy zastosowaniu naziemnego skaningu laserowego Riegl VZ-400, Episteme, 2016, s. 149-158.
- [4] Kotlicki W., Wysokiński L.: Ochrona zabudowy w sąsiedztwie głębokich wykopów, ITB Seria: instrukcje, wytyczne, poradniki nr 376/2002, Warszawa, 2002.
- [5] PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [6] Firma P.B.H.T. „Edmund Leś” – generalny wykonawca „Mogilska Tower”.
- [7] Firma Usług Projektowych Paweł Lenduszek, Dokumentacja Geologiczno-Inżynierska dla projektowanej inwestycji: Budowa budynku mieszkalnego wielorodzinnego z usługami w parterze wraz z infrastrukturą techniczną i garażem podziemnym oraz zagospodarowaniem terenu w zakresie kubatury zlokalizowanej na działce nr 657/31 obr. 4 Śródmieście w rejonie ul. Mogilskiej w Krakowie, Kraków, 2014.

- [8] Cała M., Flisiak J.: Analiza stateczności skarp i zboczy w świetle obliczeń analitycznych i numerycznych. XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Bukowina Tatrzańska, 2000.
- [9] Griffiths D.V., Lane P.A.: Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, vol. 49 (3), 1999, pp. 387-403.
- [10] RIEGL LMS.: Oprogramowanie Systemowe i Przetwarzania Danych RiSCAN PRO dla skanerów laserowych 3D firmy RIEGL LMS. Austria, 2009.
- [11] Wrana B.: Laboratory testing of soil mechanics, Kraków, Wydawnictwo PK, 2015.
- [12] MIDAS GTS NX, Manual specifications, 2016.

### **IMPACT OF DEVELOPING DEEP EXCAVATION UNDER HIGH CONSTRUCTION MOGILSKA TOWER IN KRAKOW FOR EXISTING BUILDING IN SPATIAL MODEL BASED ON FINITE ELEMENT METHODS (FEM)**

#### **S u m m a r y**

This article presents a comprehensive approach for modeling the Larsen high-trench wall-tightening technology of the Mogilska Tower in Cracow. The building as one of the few in Krakow, will have three underground floors. Design and execution of deep excavations together with their security is a difficult problem, requiring the designer of a wide range of geotechnical knowledge. Correct design of the structure and trench protection requires knowledge of the interaction between the structure of the ground and the knowledge of the technology of the wall excavation. Execution of tall buildings with underground floors in the vicinity of existing buildings involves the need to assess the impact of deep excavation on objects exposed to unequal settlements. The ITB's Instruction for deep excavations emphasizes the impact of deep excavations on the settlement of neighboring buildings using a simplified or detailed method based on finite element method (FEM). The article presents the results of the numerical modeling of the deep excavation protection of the Larsen type. The spatial layout of the geotechnical layers is taken into consideration. The spatial state of strain and deformation of the model was assumed. The stages of deep excavation have been accepted. The results of the computations were compared with the displacements obtained from geodetic and terrestrial laser scanning. The reach and influence of the deep excavation on the settlement of neighboring objects was determined.

**Keywords:** terrestrial laser, building settlements, earthworks, numerical analysis

*Przesłano do redakcji: 20.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Tadeusz NOCH<sup>1</sup>

## TERMODYNAMICZNE CZYNNIKI ROBOCZE STOSOWANE W POMPACH CIEPŁA

W opracowaniu pt. Termodynamiczne czynniki robocze stosowane w pompach ciepła opisano geotermię niskotemperaturową. Przedstawiono podstawowy podział pomp ciepła. Scharakteryzowano czynniki robocze stosowane w pompach ciepła. Omówiono przeprowadzone badania dotyczące stosowanych w technice ciepłej czynników z grupy CFC i HCFC. W szczególności analizą objęto harmonogram wycofania z użytku czynników chlorowcowopochodnych zakwalifikowanych do ww. grupy. Uwzględniono w analizie wskaźniki ekologiczne niektórych czynników chłodniczych. Pokazano, że wskaźnik ekologiczny ODP charakteryzuje wpływ danego czynnika na intensywność rozkładu ozonu. Natomiast GWP opisuje wpływ czynnika na potęgowanie efektu cieplarnianego. Z kolei TEWI jest wskaźnikiem umożliwiającym ocenę globalnego ocieplenia atmosfery, spowodowanego eksploatacją pompy ciepła lub urządzenia chłodniczego. Zwrócono uwagę na sposób obliczania wartości wskaźnika TEWI. Wyprecyzowano podstawowe właściwości najczęściej stosowanych zamienników R22. Wskazano na zmianę parametrów eksploatacyjnych pomp ciepła spowodowaną wprowadzeniem nowych czynników roboczych. W niniejszym opracowaniu podano również niezbędne kryteria uwzględniane w procesie badań i oceny przydatności czynników roboczych do pracy w obiegu pomp ciepła. Odniesiono się do efektywności energetycznej w przypadku eksploatacji pomp ciepła z wykorzystaniem źródeł niskotemperaturowych powodujące redukcję emisji CO<sub>2</sub>. W badaniu ustalono poziom korzystnego wpływu tej emisji w porównaniu z potencjałem konwencjonalnych źródeł energii. Szczególną uwagę zwrócono na technologiczne rozwiązania w zakresie minimalizacji zawartości czynnika roboczego w instalacji, związanego z ograniczeniem jego emisji do atmosfery. Przewody obiegu czynnika roboczego, łącząc poszczególne elementy i urządzenia, tworzą zamkniętą instalację pompy ciepła. W montażu miedzianych instalacji pomp ciepła stosowane są specjalne rury miedziane przeznaczone do chłodnictwa i klimatyzacji.

**Słowa kluczowe:** ekologia, środowisko, technika ciepła, czynniki z grupy CFC i HCFC, wskaźniki ekologiczne, czynniki chłodnicze, ozon, współczynnik wydajności grzejnej COP, wskaźnik ekologiczny ODP, GWP i TEWI

---

<sup>1</sup> Tadeusz Noch, Gdańska Szkoła Wyższa, Wydział Nauk Inżynierskich, ul. Biskupia 24B, 80-875 Gdańsk; tel. 602 130 709; tadeusz.noch@gsw.gda.pl

## 1. Wstęp

Wykorzystanie ciepła ze źródeł odnawialnych jest jednym z nowoczesnych i efektywnych sposobów poszanowania energii i ochrony środowiska. Problemy współczesnej energetyki rozwiązywane są poprzez promowanie i wdrażanie nowych technologii pozyskiwania i przetwarzania energii oraz poprzez racjonalizację jej wykorzystania. Przykładem jest wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych, takich jak powietrze, grunt, wody powierzchniowe i gruntowe, za pomocą pomp ciepła.

Międzynarodowa Agencja Energetyczna (IEA) przyjęła, definicję dotyczącą energii odnawialnej, określoną przez Grupę Roboczą ds. Odnawialnych Nośników Energii. Zdefiniowano, że odnawialna energia jest tą ilością energii, która jest pozyskiwana w naturalnych procesach przyrodniczych stale odnawialnych. Zakres tej definicji obejmuje np. energię słoneczną, wiatrowe, z biomasy, geotermalną, cieków wodnych oraz biopaliwa i wodór.

Zasady wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych w krajach członkowskich UE reguluje Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 roku w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych. Dyrektywa ta ustanawia wspólne ramy promowania energii ze źródeł odnawialnych [1].

## 2. Geotermia niskotemperaturowa

Źródła energii geotermicznej klasyfikuje się w zależności od stanu skupienia nośnika ciepła i jego temperatury. W klasyfikacji tej rozróżnia się: grunty i skały do głębokości 2500 m, przypowierzchniowe wody gruntowe, gorące i ciepłe wody w głębie, para wodna, wysady solne oraz gorące skały [2]. Płyny geotermalne, wypełniające zbiorniki naturalnych basenów sedymentacyjno-strukturalnych, mają różną temperaturę. Polska zalicza się do krajów, które posiadają bogate zasoby wód geotermalnych o średniej entalpii.

Badania wykazały, że na obszarze Polski znajduje się około 6500 km<sup>3</sup> wód termalnych o temperaturze ok. 30÷120°C. Najbardziej korzystne warunki do eksploatacji wód geotermalnych znajdują się w okręgu szczecińsko-łódzkim [3, 4].

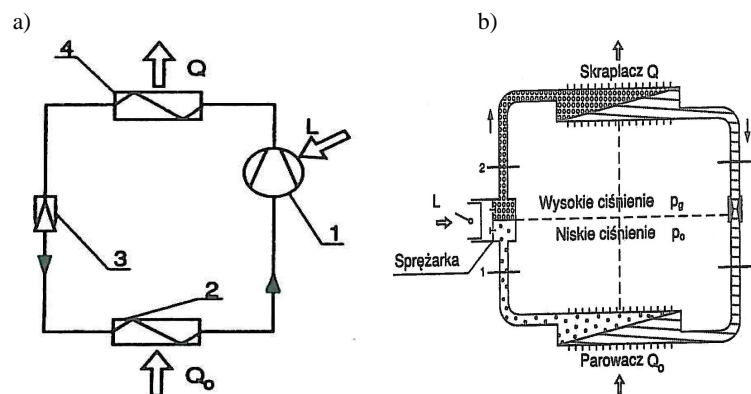
W Polsce, jako umowną granicę pomiędzy wodami termalnymi a niskotemperaturowymi przyjmuje się temperaturę 20°C. Temperatura nośnika ciepła, wynosząca 20°C, jest mierzona na wypływie z otworu wiertniczego. Została ona formalnie przyjęta za wartość graniczną, od której Prawo geologiczne i górnicze uznaje wody podziemne za termalne [5].

### 3. Podstawy działania pomp ciepła

W pompie ciepła zachodzi proces podnoszenia potencjału cieplnego. Występuje proces pobierania ciepła ze źródła o niższej temperaturze  $T_o$  i przekazywania go do źródła o temperaturze wyższej  $T_g$  [6].

W sprężarkowej pompie ciepła transformacja ciepła urzeczywistniona jest za pomocą czynnika roboczego, który krążąc w zespole urządzeń, poddawany jest ciągłemu przemian. Zjawisko to tworzy tzw. lewobieżny obieg Lindego. Instalację sprężarkowej pompy ciepła tworzą: dolne źródło ciepła (źródło ciepła niskotemperaturowego), sprężarkowa pompa ciepła, górne źródło ciepła (instalacje odbiorcze).

W procesie technologicznym przesyłu ciepła za pomocą pompy ciepła wykorzystywany jest czynnik roboczy. Ideowy schemat instalacji sprężarkowej pompy ciepła oraz zmiany fazy czynnika roboczego w instalacji pompy ciepła pokazuje rys. 1 [6].



Rys. 1. Ideowy schemat instalacji sprężarkowej pompy ciepła oraz zmiany fazy czynnika roboczego – schemat ideowy instalacji (a); zmiany fazy czynnika roboczego (b), na podstawie [6]

schemat ideowy instalacji: 1 – agregat sprężarkowy, 2 – parowacz, 3 – zawór rozprężny, 4 – skraplacz

Fig. 1. Schematic diagram of heat pump compressor installation and the change of phase of a heat exchanger – schematic diagram of installation (a); change of a phase of a heat exchanger (b), based on [6]

schematic diagram of installation: 1 – compressor, 2 – evaporator, 3 – expansion valve, 4 – condenser

Badając funkcjonowanie sprężarkowej pompy ciepła można stwierdzić, że efektem jej działania jest wykorzystanie ciepła przegrzania i ciepła skraplania pary czynnika roboczego do podgrzania nośnika ciepła w instalacji odbiorczej.

Energetyczny bilans pompy ciepła przedstawia wzór (1), zaś teoretyczny współczynnik wydajności grzewczej  $COP_T$  – wzór (2).

$$Q = Q_o + L \quad (1)$$

$$COP_t = COP_L = \frac{Q_o + L}{L} = 1 + \frac{Q_o}{L} \quad (2)$$

gdzie:  $Q$  – ilość ciepła uzyskanego w skraplaczu, kJ,  
 $Q_o$  – ilość ciepła pobranego w parowaczu, kJ,  
 $L$  – praca dostarczona do sprężarki, kJ.

Odnosząc wielkości występujące w równaniu (2) do 1 kg czynnika roboczego krążącego w obiegu otrzymamy:

$$q = q_o + l \quad (3)$$

oraz

$$COP_t = COP_L = \frac{q}{l} \quad (4)$$

gdzie:  $q$  – właściwa wydajność grzejna obiegu, kJ/kg,  
 $l$  – właściwa praca sprężania w obiegu, kJ/kg,  
 $q_o$  – jednostkowa ilość ciepła pobranego w parowaczu z dolnego źródła, kJ/kg.

#### 4. Czynniki robocze w pompach ciepła

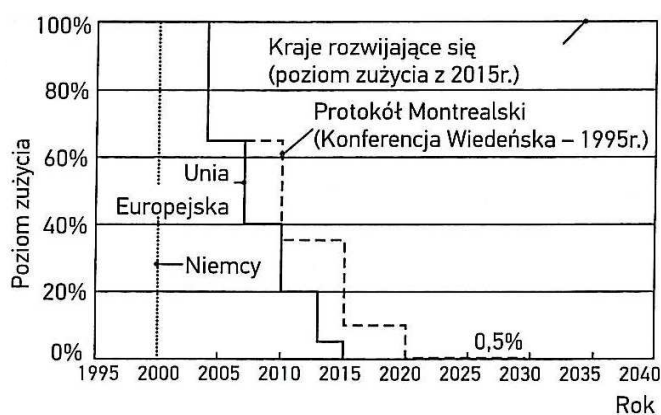
Czynnikiem roboczym, stosowanym w pompach ciepła jest czynnik termodynamiczny, który podczas obiegu pośredniczy w przekazywaniu ciepła ze źródła dolnego do źródła górnego (odbiornika). Od właściwości czynnika roboczego zależą rodzaj konstrukcji pompy ciepła i zużycie energii napędowej. W początkowej fazie rozwoju techniki chłodniczej i pomp ciepła stosowano czynniki naturalne jak np. amoniak. Z uwagi na niekorzystne właściwości amoniaku (toksyczność, wybuchowość, korozyjne działanie na miedź i jej stopy) uniemożliwiły szersze jego zastosowanie w urządzeniach klimatyzacyjnych, chłodniczych i pompach ciepła. Później wyprodukowano syntetyczne czynniki chłodnicze, zwane freonami. Czynniki te występowały jako chlorowcowopochodne węglowodorów nasyconych i nienasyconych. Freony były nietoksyczne, niepalne i nieagresywne w stosunku do miedzi. Zastosowano je w technice, z uwagi na możliwość budowy automatycznych, hermetycznych urządzeń chłodniczych i pomp ciepła. Najczęściej stosowane są syntetyczne czynniki robocze, pochodne węglowodorów nasyconych i nienasyconych. W oparciu o budowę chemiczną czynnika termodynamicznego wprowadzono jednolity system nazewnictwa czynników chłodniczych, tj. czynników roboczych w pompach ciepła. System ten później stał się standardem ISO. Oznaczenie czynnika chłodniczego składa się z kilku symboli, których znaczenie jest związane z ich wartością i pozycją w nazwie [7].

W zależności od budowy cząsteczki, czynniki chłodnicze i robocze przyporządkowuje się do odpowiedniej grupy związków chemicznych, np. [6]:

- CFC – chlorofluorowęglowodory; oznaczenie w pełni halogenowych związków węgla, w których wszystkie atomy wodoru w cząsteczce zostały zastąpione atomami chloru i fluoru; charakteryzuje je duża stabilność chemiczna,
- HCFC – wodorochlorofluorowęglowodory; oznaczenie substancji organicznych, w których nie wszystkie atomy wodoru w cząsteczce zostały zastąpione przez atomy chloru i fluoru,
- HFC – hydrofluorowęglowodory; oznaczenie substancji organicznych, w cząsteczkach których część atomów wodoru została zastąpiona atomami fluoru.

Ze względu na ochronę środowiska stosowane są coraz częściej czynniki robocze będące dwu lub trójskładnikowymi roztworami. Tworzą one grupę tzw. czynników zeotropowych, gdyż podczas izobarycznych procesów wrzenia lub skraplania zmienia się temperatura. Procesy te nie są izotermiczne i występuje w nich tzw. poślizg temperaturowy  $\Delta T_g$  (różnica między temperaturą pary suchej nasyconej a temperaturą wrzenia roztworu w warunkach tego samego ciśnienia). Do najczęściej używanych w pompach ciepła czynników zeotropowych zalicza się: R 404A, R 407C, R 410A.

Badania wykazały, że stosowanie w technice cieplnej czynników z grupy CFC i HCFC szkodzi środowisku poprzez degradację ozonu stratosferycznego (freony są rozkładane a chlor niszczy ozon). Dla ograniczenia negatywnych skutków związków CFC i HCFC wprowadzono międzynarodowe regulacje prawne. Zorganizowana Konferencja Wiedeńska dotyczyła ochrony stratosferycznej warstwy ozonowej. Skutkiem tej konferencji było przejście Protokołu Montrealskiego, który wszedł w życie 1 stycznia 1989 roku. Polska jest sygnatariuszem obu porozumień. Protokół Montrealski zawiera szczegółowy harmonogram wycofania z użytku czynników chlorowcowopochodnych, tj. grupa CFC i HCFC. Harmonogram wycofania czynników HCFC pokazuje rys. 2 [8].



Rys. 2. Harmonogram wycofania czynników HCFC, na podstawie [8]

Fig. 2. Schedule of HCFC exchangers withdrawal, based on [8]

Z analiz wynika, że Protokół Montrealski stanowi początek wycofania z użytku substancji zubożających warstwę ozonową (chlorofluorowęglowodórów oraz wodorochlorofluorowęglowodórów). Natomiast w Polsce sprawy dotyczące eksploatacji urządzeń napełnianych czynnikami HCFC reguluje Ustawa z dnia 15 maja 2015 roku o substancjach zubożających warstwę ozonową oraz o niektórych fluorowanych gazach cieplarnianych [9]. W Polsce postanowienia Protokołu Montrealskiego są realizowane ustawowo, wobec czego zakazano stosowania czynników CFC w nowych instalacjach chłodniczych; istnieje również zakaz serwisowania oraz handlu tymi urządzeniami. W Europie przyjęto działania, mające na celu znaczną redukcję zużycia tych substancji do celów techniki chłodniczej [10].

Odnośnie substancji zubożających warstwę ozonową podjęto decyzję o wycofaniu z użycia czynników z grupy HCFC. W powyższej sprawie określony został szczegółowy kalendarz ich wycofania zawarty w postanowieniach Dyrektywy Europejskiej [11].

Od 1 stycznia 2010 roku wprowadzony został zakaz importu, dystrybucji oraz stosowania wodorochlorofluorowodórów. Natomiast od 1 stycznia 2015 roku zakaz ten obejmuje wszystkie wodorochlorofluorowęglowodory w tym również substancje z odzysku. Z analizy wynika, że w krajach Unii Europejskiej instalacje chłodnicze i klimatyzacyjne napełnione czynnikami HCFC, głównie R22 podlegają wymianie, modernizacji lub należy poddać procesowi wymiany czynnika i zastąpienia go alternatywną substancją, nieszkodliwą w stosunku do warstwy ozonowej [12].

Problemy związane z wycofaniem czynników HCFC mogą być rozwiązywane z uwzględnieniem określonych wariantów:

- całkowita wymiana urządzeń napełnionych R22 na inne: napełnione czynnikami naturalnymi (R717, R744, R290 itd.) oraz czynnikami syntetycznymi (R407C, R410A, R422D, R507 itd.),
- przebrojenie całych urządzeń na czynniki z grupy HFC: R407C, R404A, R507,
- zastąpienie R22 czynnikami z grupy HFC: R134a, R417A, R419A, R422A, R422D, R427A,
- serwisowanie urządzeń napełnionych R22 tak długo, jak to jest możliwe.

Do oceny wpływu czynników chłodniczych na środowisko stosowane są trzy wskaźniki ekologiczne:

- potencjał niszczenia ozonu ODP – Ozon Depletion Potential,
- globalny potencjał ocieplenia GWP – Global Warming Potential,
- całkowity równoważny wskaźnik ocieplenia TEWI – Total Equivalent Warming Impact.

Wskaźniki ekologiczne niektórych czynników chłodniczych przedstawia tabela 1 [6].

Tabela 1. Wskaźniki ekologiczne niektórych czynników chłodniczych, na podstawie [6]

Table 1. Ecological indicators of some refrigerants, based on [6]

Lp.	Czynnik chłodniczy		Normalna temperatura wrzenia (°C)	Wskaźniki ekologiczne		Żywotność w atmosferze, lata
	Grupa	Oznaczenie		ODP	GWP	
1	CO <sub>2</sub>	R744	-40	0,0	1,0	–
2	CFC	R12	-30	1,0	7 300	120
3	HCFC	R22	-41	0,055	1 500	15,3
4	HFC	R134a	-26	0,0	1 200	15,3

Wskaźnik ekologiczny *ODP* charakteryzuje wpływ danego czynnika na intensywność rozkładu ozonu. Wartość tego wskaźnika jest odniesiona do właściwości R11.  $ODP_{R11} = 1$ . Dla naturalnych czynników chłodniczych  $ODP = 0$ . Drugi wskaźnik ekologiczny *GWP* opisuje wpływ czynnika na potęgowanie efektu cieplarnianego. Wartości tego wskaźnika odniesione są do właściwości dwutlenku węgla R744 i horyzontu czasowego oddziaływania danej substancji (wynoszącego 100 lat),  $GWP_{R744} = 1$ . Kolejny wskaźnik ekologiczny *TEWI* jest to całkowity równoważny wskaźnik ocieplenia. *TEWI* jest wskaźnikiem umożliwiającym ocenę globalnego ocieplenia atmosfery, spowodowanego eksploatacją pompy ciepła lub urządzenia chłodniczego. Wskaźnik ten uwzględnia bezpośredni wpływ czynników wpływających przez nieszczelności instalacji oraz pośredni udział energii wymaganej do zasilania urządzeń przez cały okres eksploatacji. *TEWI* ma istotne znaczenie w przypadku porównywania alternatywnych urządzeń lub czynników roboczych. Uzależnione jest to od warunków takiego samego zastosowania i tego samego usytuowania. Wartość wskaźnika *TEWI* oblicza się za pomocą wzoru:

$$TEWI = GWP \cdot L \cdot n + n \cdot E_a \cdot \beta \quad (5)$$

gdzie: *TEWI* – całkowity równoważny wskaźnik ocieplenia, [kg CO<sub>2</sub>],

*GWP* – globalny potencjał ocieplenia czynnika roboczego,

*L* – roczne straty czynnika przez nieszczelności, [kg/a],

*n* – czas eksploatacji urządzenia, [a],

*E<sub>a</sub>* – roczne zużycie energii napędowej, [kWh/a],

$\beta$  – wskaźnik emisji CO<sub>2</sub> w procesie wytwarzania 1 kWh energii napędowej, [kgCO<sub>2</sub>/kWh],

przy czym

$GWP \cdot L \cdot n$  – wpływ bezpośredniej emisji czynnika roboczego,

$n \cdot E_a \cdot \beta$  – wpływ zużycia energii napędowej.

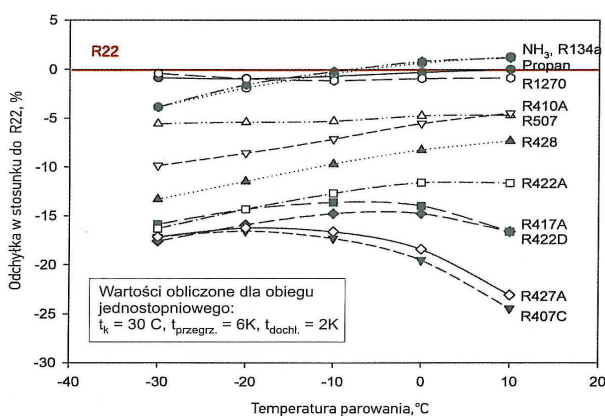
Wskaźnik *TEWI* oblicza się nie tylko w stosunku do samego czynnika roboczego lecz w odniesieniu do określonej pompy ciepła lub urządzenia chłodniczego. Wskaźnik ten ulega zmianie w zależności od rodzaju urządzenia i zależy

od wartości parametrów przyjętych w założeniach. W szczególności są to parametry, do których zalicza się czas działania, trwałość eksploatacyjna, efektywność obiegu i jego sprawność.

Obowiązujące przepisy, dotyczące ochrony stratosferycznej warstwy ozonowej, zabraniają stosowania nowych pomp ciepła napełnionych R22 (HCFC22). Potencjał niszczenia ozonu R22 wynosi  $ODP = 0,055$ .

Analizując omawianą problematykę zauważa się, że czynnik R410A jest długoterminowym zamiennikiem R22 w klimatyzatorach, domowych i handlowych urządzeniach chłodniczych, pompach ciepła, a także w nowo projektowanych układach chłodniczych w przemyśle i supermarketach. Czynnik ten znajduje również zastosowanie w układach niskotemperaturowych, w których stosowano dotychczas czynnik R13B1, należący do grupy czynników CFC [13].

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że wymiana czynnika roboczego w pompie ciepła lub chłodziarce spowoduje zmianę ich osiągnięć, tj. mocy grzewczej i chłodniczej. Nastąpi również zmiana wskaźnika efektywności energetycznej. Względna zmiana wartości  $COP$  różnych zamienników R22 pokazana jest na rysunku 3 [14].



Rys. 3. Względna zmiana wartości  $COP$  różnych zamienników R22, na podstawie [14]

Fig. 3. Relative changes of  $COP$  for different R22 replacements, based on [14]

Przy ocenie przydatności czynników roboczych do pracy w obiegu pomp ciepła należy uwzględnić pewne ustalone kryteria. Do nich zalicza się wartość współczynnika wydajności grzewczej  $COP$  oraz wartość i zakres ciśnienia nasycenia. Jako kolejne kryterium przyjęto objętościową wydajność grzejną. W analizowanym zakresie istotne znaczenie ma wpływ na środowisko tzw. ekologia, która dotyczy wartości wskaźników ekologicznych  $ODP$ ,  $GWP$  oraz  $TEWI$ .



## 5. Zakończenie

Analizując czynnik roboczy w obiegu pompy ciepła zauważa się, że wartość wskaźnika globalnego potencjału ocieplenia *GWP* czynnika roboczego zastosowanego w obiegu pompy ciepła nie może przekraczać  $ITH = 100$  lat, wartość  $GWP = 2000$ . W przypadku, gdy wartość *GWP* czynnika jest niższa niż 150, np.  $GWP < 150$ , to wartości podanych wskaźników *COP*, *EER* i *PER* należy zmniejszyć o 15%. W instalacji pozyskiwania ciepła niskotemperaturowego stosowane nośniki ciepła nie mogą być substancjami niebezpiecznymi, co reguluje Dyrektywa Rady 67/548/EWG.

W procesie budowy pomp ciepła należy uwzględnić obowiązujące wymagania, w szczególności dotyczące minimalizacji zawartości czynnika roboczego w instalacji. Przy zastosowaniu czynników syntetycznych chodzi o minimalizację ich emisji do atmosfery. Natomiast w przypadku amoniaku wprowadzone wymagania związane są względami bezpieczeństwa [6].

Przewody obiegu czynnika roboczego łączą poszczególne elementy i urządzenia. Tworzą zamkniętą instalację pompy ciepła. W pompach ciepła z syntetycznymi czynnikami roboczymi instalacja wykonywana jest, w zależności od średnicy, z rur stalowych lub bezkwasowych rur miedzianych. W technologiach związanych z montażem miedzianych instalacji pomp ciepła stosowano rury miedziane, spełniające wymagania normy PN-EN 12735-1:2000 Miedź i stopy miedzi.

## Literatura

- [1] Dyrektywa parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 roku w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
- [2] Sobański R., Kabat M.: Sposoby zagospodarowania niskotemperaturowych źródeł ciepła w ogrzewnictwie scentralizowanym. The International Conference of Air Conditioning & District Heating, Wrocław-Szklarska Poręba 1998.
- [3] Sobański R.: Energetyka geotermalna. Ekspertyza „Ekologiczne aspekty przetwarzania energii”. Wyd. Polska Akademia Nauk, Wydział IV Nauk Technicznych. Warszawa 1996.
- [4] Górecki W.: Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim. Wyd. GEOS, Kraków 1995.
- [5] Kapuściński J, Rodzoch A.: Geotermia niskotemperaturowa w Polsce – stan aktualny i perspektywy rozwoju, Warszawa 2006.
- [6] Rubik M.: Pompy ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej. Wyd. MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2011.
- [7] Europejska Komisja Międzynarodowego Komitetu Chłodnictwa – jednolity system nazewnictwa czynników chłodniczych (czynników roboczych w pompach ciepła).
- [8] Bonca Z. i inni: Nowe czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. Własności cieplne, chemiczne i użytkowe. Wyd. IPPU MASTA, Gdańsk 2004.

- [9] Ustawa z dnia 15 maja 2015 r. o substancjach zubożających warstwę ozonową oraz o niektórych fluorowanych gazach cieplarnianych (Dz.U. poz. 881).
- [10] Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee, UNEP. Nairobi, Kenya, January 2003.
- [11] Dyrektywa Europejska 2037/2000/UE w sprawie substancji zubożających warstwę ozonową – kalendarz wycofania z użycia czynników z grupy HCFC.
- [12] Skrzypulec W.: Retrofit – konieczność czy wolny wybór. Chłodnictwo & Klimatyzacja 9/2008.
- [13] Gutkowski M., Butrymowicz D.J.: Chłodnictwo i klimatyzacja. Wyd. WTN, Warszawa 2012.
- [14] Eckhoff W., Flor F., Puhl Ch.: Zamiennik R22 – o czym należy pamiętać – cz. 1. Chłodnictwo & Klimatyzacja 12/2008.

## THERMODYNAMIC HEAT EXCHANGERS USED IN HEAT PUMPS

### Summary

In the article entitled “Thermodynamic heat exchangers used in heat pumps” low-temperature geothermal energy was described. Basic classification of heat pumps was presented. Heat exchangers and the research concerning heat exchangers representing groups CFC and HCFC, which are used in the heat technology, were described. In particular, the schedule of withdrawal from use chlorine-derived exchangers, which belong to the latter groups, was analyzed. Ecologic indicators of some refrigerants were taken into account. It was presented that ecologic indicator ODP illustrates the influence of a certain refrigerant on an intensity of ozone decomposition. GPW indicates the influence of a certain refrigerant on the greenhouse effect. TEWI is an indicator which allows to assess global warming of the atmosphere, caused by heat pumps or refrigerating equipment. It was especially highlighted how the TEWI indicator is calculated. Basic features of most commonly used R22 replacements were specified. It was shown how exploitation parameters of heat pumps change if new heat exchangers are applied. In the article, the most significant criteria of heat exchanger evaluation in terms of their applicability in the heat pump loop were presented. The energetic efficacy of the heat pump exploitation using low-temperature geothermal energy and its CO<sub>2</sub> emission reduction was mentioned. The results of the research establish the level of positive influence of this kind of emission in comparison with conventional sources of energy. Particular attention was paid to the technological solutions in the field of minimization the amount of heat exchanger in the installation, related to the reduction of its emission to the atmosphere. Pipes for heat exchanger circuit connect all modules and devices, creating closed installation of heat pump. In the installation process of copper heat pump systems, special copper pipes, dedicated to refrigeration and air conditioning, are used.

**Keywords:** ecology, environment, heat technology, exchangers from groups CFC and HCFC, ecological indicators, refrigerants, ozone, coefficient of performance COP, ecologic indicator ODP, GWP, TEWI

*Przesłano do redakcji: 11.05.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Halina GARBALIŃSKA<sup>1</sup>  
Klaudia NARODOWSKA<sup>2</sup>

## WPŁYW SKŁADU MIESZANKI I WYJŚCIOWEGO ZAWILGOCENIA KRUSZYWA LEKKIEGO NA SORPCYJNOŚĆ KAPILARNĄ BETONU KERAMZYTOWEGO

W artykule opisano badania kapilarności przeprowadzone na grupie sześciu betonów keramzytowych, wykonanych na bazie tych samych składników. W każdym przypadku użyto tego samego cementu portlandzkiego 42,5 R, wody wodociągowej pitnej oraz kruszywa keramzytowego frakcji 4 – 8 mm oraz piasku kwarcowego frakcji 0 – 2 mm. Poszczególne receptury różniły się po pierwsze stanem wilgotnościowym kruszywa grubego, które wprowadzane było do mieszanki jako kruszywo suche (S), powietrzno-suche (P) oraz w pełni nasycone wodą (N). Po drugie mieszanki różniły się objętościowym udziałem kruszywa lekkiego i zaprawy cementowej. Przyjęto proporcje zaprawa cementowa : kruszywo keramzytowe na poziomie 1:1 oraz 3:2. W rezultacie badaniom poddano 6 mieszanek umownie oznaczonych jako S 1:1, P 1:1, N 1:1 oraz S 3:2, P 3:2, N 3:2. Wykazano, że betony te charakteryzują się wyraźnie różnym tempem podciągania kapilarnego, a tym samym różnymi wartościami współczynników sorpcji kapilarnej  $A$ . Najlepszymi parametrami odznaczały się betony wykonane na kruszywie suchym o stosunku zaprawa:kruszywo 1:1. Wykazały one najniższą wartość współczynnika sorpcji wynoszącą  $A = 0,9 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$ . Ten rodzaj betonu będzie najefektywniej blokował wnikanie wody w beton i w konsekwencji będzie odznaczał się najwyższą odpornością na działanie substancji korozyjnych wprowadzanych z wodą oraz najwyższą mrozoodpornością. Najgorszymi parametrami charakteryzowały się keramzytobetony o większym udziale objętościowym zaprawy cementowej, tj. o proporcjach zaprawa:kruszywo keramzytowe 3:2. Przy czym w przypadku kruszywa nasyconego wodą (N) i ziarnach wysuszonych na powierzchni (P) uzyskano współczynniki  $A$  wyższe odpowiednio 2,5÷2,8 razy w stosunku do receptury S 1:1.

**Słowa kluczowe:** keramzytobeton, kapilarność, współczynnik sorpcji wody, wilgotność kruszywa lekkiego

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Halina Garbalińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 48 29, e-mail: Halina.Garbalińska@zut.edu.pl

<sup>2</sup> Klaudia Narodowska, absolwentka Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, 91-449-48-29, nar.klaudia@wp.pl

## 1. Wstęp

Znaczącą rolę w kształtowaniu właściwości zarówno samej mieszanki, jak i dojrzałego kompozytu odgrywa skład recepturowy, jak również podejmowane zabiegi technologiczne, w tym wstępne nawilżenie kruszywa lekkiego.

W ramach pracy [6] przeprowadzono badania, których celem miała być analiza wpływu wyjściowego zawilgocenia kruszywa lekkiego oraz stosunku objętości tego kruszywa do objętości zaprawy w mieszance betonowej na przebieg procesu podciągania kapilarnego, będącego miernikiem późniejszej trwałości materiału eksploatowanego w zmiennych warunkach środowiskowych.

Wysoka podatność kruszywa lekkiego na absorpcję wody z mieszanki betonowej jest jedną z najbardziej niepożądanych cech, a wyeliminowanie jej negatywnego wpływu na urabialność mieszanki betonowej jest stosunkowo trudnym procesem. Zgodnie z informacjami zawartymi w [2] kruszywo lekkie w stanie suchym jest zdolne do odciążenia z 1 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej 30÷90 kg wody. Równocześnie jednak owa zdolność do absorpcji wpływa na obniżenie współczynnika wodno-cementowego, co powoduje wzmocnienie matrycy cementowej, a absorpcja zaczynu z mieszanki betonowej przyczynia się do doszczelnienia i wzmocnienia struktury ziaren kruszywa lekkiego.

Niestety powszechnie stosowane metody projektowania składu betonów zwykłych nie kwalifikują się do zastosowania w przypadku betonów lekkich, bowiem nie uwzględniają m.in. możliwości wchłaniania wody przez ziarna kruszywa, [1, 3]. Najczęściej stosowaną metodą do określenia składu mieszanki betonów lekkich jest metoda objętościowa [2].

Betony lekkie, jeśli są eksploatowane w kontakcie z otoczeniem, narażone są na liczne wpływy środowiskowe, m.in. związane z działaniem wody pochodzącej z różnych źródeł, omówionych np. w [5]. Najbardziej destrukcyjnie działa woda w fazie ciekłej, wprowadzona do wnętrza elementu w wyniku działania sił podciągania kapilarnego. Transport kapilarny dotyczy porowatych materiałów budowlanych, w których woda rozprzestrzenia się, wędrując siecią naczyń włosowatych występujących w obrębie materiałów porowatych. W zależności od specyficznej mikrostruktury poszczególnych materiałów, woda w różnym tempie i różnym zakresie wprowadzana jest do wnętrza przegrody budowlanej.

## 2. Współczynnik sorpcji kapilarnej

Parametrem opisującym ilościowo zjawisko podciągania kapilarnego w porowatym materiale jest współczynnik sorpcji  $A$ . Metodyka jego pomiaru sposobem tradycyjnym polega na zetknięciu z lustrem wody jednej z powierzchni badanej próbki, a następnie rejestracji tempa zachodzącego w niej procesu nie-stacjonarnego. Oznaczenie wartości omawianego współczynnika sprowadza się w takim wypadku do pomiaru masy wody wchłoniętej przez próbkę w jednostce

czasu, przy czym rejestracja prowadzona jest często aż do momentu ustabilizowania się masy badanych próbek, [4].

Współczynnik sorpcji wody  $A$ , zgodnie z normą PN-EN ISO 9346 [7], definiowany jest następującą zależnością:

$$m_s = A \sqrt{t} \quad (1)$$

gdzie:

$A$  – współczynnik sorpcji wody, [kg/(m<sup>2</sup>h<sup>1/2</sup>)],

$m_s$  – masa wilgoci zaabsorbowanej z powierzchni styku z wodą, podzielona przez pole tej powierzchni, [kg/m<sup>2</sup>],

$t$  – czas, [h].

Współczynnik  $A$  jest interpretowany jako tangens kąta nachylenia liniowego odcinka na wykresie funkcji  $\Delta m_t / F = f(\sqrt{t})$ . Przy czym  $\Delta m_t$  oznacza przyrost masy badanej próbki po czasie  $t$ , natomiast  $F$  – powierzchnię jej kontaktu z wodą, [4]. Współczynnik sorpcji kapilarnej, który uwarunkowany jest w największym stopniu charakterem struktury porowatości materiału, można zatem wyznaczać za pomocą wzoru, [5]:

$$A = \frac{\Delta m_t}{F \Delta \sqrt{t}} \quad (2)$$

który zastosowany został w tej postaci w obliczeniach współczynników  $A$  odnoszących się do poszczególnych próbek, wykonanych według sześciu przyjętych receptur.

### 3. Opis zrealizowanych badań

Do wykonania betonów lekkich, testowanych w ramach pracy [6], zostało użyte kruszywo keramzytowe o wymiarach ziaren od 4 do 8 mm, które wprowadzono do mieszanki w trzech różnych stanach nawilżenia, jako: nasycone (N), suche (S) i powierzchniowo-suche (P). Dodatkowo testowano dwa warianty objętościowych relacji składników, przyjmując stosunek objętości zaprawy do objętości kruszywa równy 1:1 oraz 3:2. Wykorzystano w każdym przypadku ten sam cement portlandzki 42,5R, ten sam piasek kwarcowy o granulacji 0÷2 mm oraz wodę wodociągową pitną.

W celu uzyskania miarodajnych i jednoznacznych wyników podjęto się wykonania wstępnych badań poszczególnych surowców użytych do wytworzenia wszystkich mieszanek.

Aby uzyskać dane pozwalające określić czas suszenia i nasączenia kruszywa lekkiego, przeprowadzono analizę właściwości keramzytu. Badanie wykonywane przy użyciu piknometru wykazało, iż keramzyt charakteryzuje się gęstością ziaren na poziomie 669 kg/m<sup>3</sup>. Jego gęstość nasykowa w stanie luźnym

wyniosła  $376 \text{ kg/m}^3$ , natomiast w postaci zagęszczonej  $405 \text{ kg/m}^3$ . Znaczna jamistość omawianego kruszywa lekkiego, około 52%, wskazywała na obecność licznych wolnych przestrzeni pomiędzy poszczególnymi ziarnami. Zważywszy na niezwykle niską wilgotność keramzytu w stanie naturalnym, zdecydowano się na jej nieuwzględnianie w trakcie przygotowywania mieszanek betonowych.

Przeprowadzono natomiast systematyczne badania nasiąkliwości, które pozwoliły uzyskać informacje o zmianach tej właściwości w trakcie 48-godzinnego namaczania kruszywa. Wyznaczone w charakterystycznych punktach czasowych nasiąkliwości wynosiły: po 5 minutach:  $W_s = 18,29\%$ ; po 60 minutach  $W_{60} = 20,45\%$ ; po 24 godzinach  $W_{24} = 26,15\%$ ; po 48 godzinach  $W_F = 27,56\%$ .

Podjęto się także przebadania kinetyki procesu wysychania, aby uzyskać informacje na temat zwiększania się głębokości strefy suchej ziaren keramzytu wraz z upływem czasu. Dane te wykorzystano w [6] przy dobieraniu poszczególnych stanów wilgotnościowych kruszywa grubego.

Dodatkowo określono także właściwości zastosowanego do produkcji mieszanki betonowej kruszywa drobnego oraz cementu portlandzkiego. Stosując normowy zestaw sit badawczych określono skład granulometryczny piasku kwarcowego. Zbadano również wilgotność kruszywa drobnego w stanie naturalnym, która wyniosła 3,64%. Przeprowadzone badania cementu portlandzkiego 42,5R pozwoliły potwierdzić zgodność jego cech z wymaganiami normowymi. W badaniach wytrzymałości na ściskanie przeprowadzonych po upływie 28 dni dojrzewania uzyskano wartość średnią rzędu 56 MPa. Określony doświadczalnie na dwóch próbach początek czasu wiązania wyniósł  $215 \div 220$  min, natomiast koniec wiązania  $240 \div 270$  min.

Ustalenie składu mieszanki betonowej rozpoczęto od określenia objętości nasypowej całkowicie nasączonego i zagęszczonego kruszywa keramzytowego. Oznaczenie przeprowadzono na trzech próbkach kruszywa, używając do tego celu odpowiedniego cylindra pomiarowego. W kolejnym etapie wyznaczono ilości wody i piasku niezbędne do wytworzenia zaprawy, dla wstępnie przyjętej masy cementu równej 400 g. W trakcie przeprowadzania obliczeń uwzględniono również korektę ilości wody i piasku z uwagi na wilgotność naturalną kruszywa.

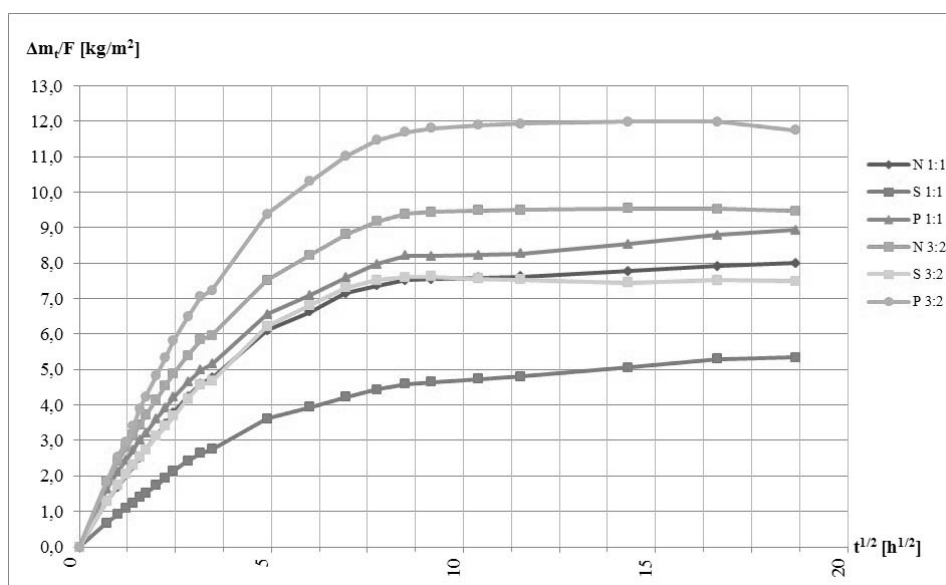
Do analizy przebiegu podciągania kapilarnego, a w szczególności wyznaczenia współczynników sorpcji kapilarnej  $A$ , wykorzystano łącznie 24 próbki prostopadłościennych o wymiarach  $4 \times 4 \times 16$  cm. Zastosowano w badaniach po 12 próbek dla dwóch przyjętych stosunków ilości zaprawy do ilości kruszywa keramzytowego, tj. 1:1 oraz 3:2, przy czym dla każdego z tych stosunków wykorzystano po 4 próbki z kruszywem w trzech stanach nasycenia: suchym, powierzchniowo-suchym i nasyconym. W celu określenia sorpcyjności każdego z testowanych betonów zastosowano metodę grawimetryczną, w której próbki poddawane były działaniu wody podciąganej przeciwnie do kierunku działania siły grawitacji. Wszystkie 24 prostopadłościennych próbki sześciu rodzajów betonu lekkiego kruszywowego zostały umieszczone w układzie pionowym w kuwe-

tach wyłożonych stabilizującymi podkładkami, a ich dolne powierzchnie zostały zalane destylowaną wodą na wysokość ok. 0,2 cm.

Rejestrację wzrastającej masy próbek, poddanych procesowi podciągania kapilarnego, prowadzono przez okres 12 dni, ważąc je w ustalonych odstępach czasu, dostosowanych do tempa przebiegu procesu. Ważenie próbek przeprowadzono z wykorzystaniem wagi laboratoryjnej o dokładności 0,01 g, na którą beleczki trafiały po dokładnym osączeniu z zewnętrznego zawilgocenia.

#### 4. Wyniki uzyskane w badaniach kapilarności

Przeprowadzone pomiary pozwoliły na graficzne odwzorowanie analizowanych zależności, tj. zmieniającej się masy próbek odniesionej do pola ich powierzchni mających kontakt z wodą, w funkcji pierwiastka z czasu. Zbiorcze wykresy wypadkowych przebiegów zestawiono na rys. 1.

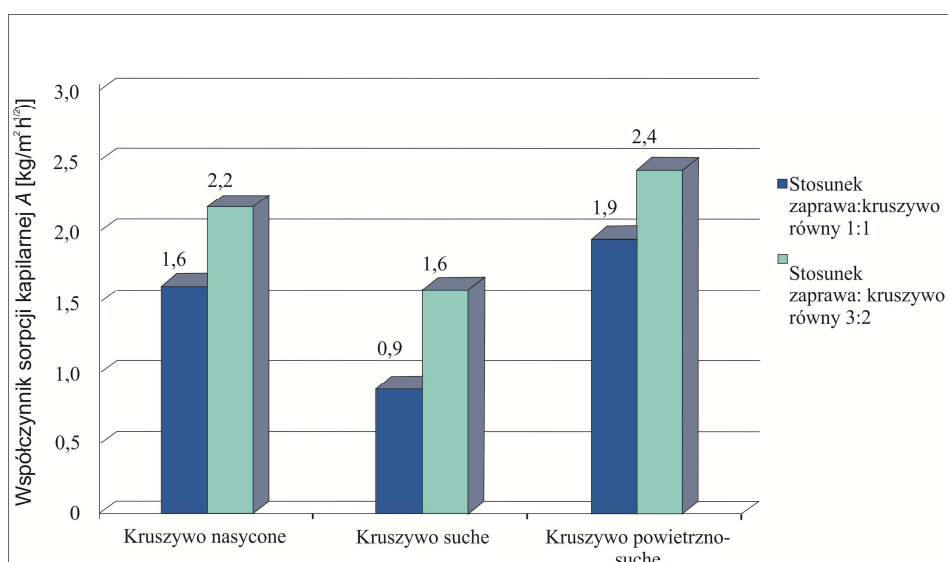


Rys. 1. Zestawienie uśrednionych zależności  $\Delta m_w/F = f(\sqrt{t})$  dla sześciu betonów lekkich na kruszywie keramzytowym w trzech różnych stanach zawilgocenia, przy dwóch odmiennych stosunkach objętościowych zaprawy do kruszywa grubego

Fig. 1. Statement of the average relationship  $\Delta m_w/F = f(\sqrt{t})$  for six lightweight concretes based on expanded clay aggregates, for three different moisture states, and two different volume ratios of mortar and coarse aggregate

Wyznaczenie współczynników sorpcji kapilarnej  $A$  sprowadzało się do przyjęcia określonej liczby punktów pomiarowych we wczesnym etapie badania podciągania kapilarnego, które lokowały się w zakresie liniowej zależności

zmieniającej się masy próbek w odniesieniu do powierzchni ssania w funkcji pierwiastka z czasu. Uzyskane wypadkowe wartości współczynników  $A$  zobrażowano w postaci wykresu kolumnowego na rysunku 2.



Rys. 2. Średnie wartości współczynnika sorpcji  $A$  dla poszczególnych kombinacji stanu zawilgocenia kruszywa i stosunku objętości zaprawy do objętości kruszywa grubego

Fig. 2. Average values of sorption coefficient  $A$  for particular moisture states of aggregate and volume ratio of mortar and coarse aggregate

## 5. Podsumowanie

Analiza uzyskanych uśrednionych wykresów  $\Delta m_t/F = f(\sqrt{t})$  sześciu betonów lekkich wykonanych na bazie kruszywa keramzytowego wykazała, iż w zależności od stanu zawilgocenia kruszywa, a także przyjętego stosunku objętości zaprawy do objętości kruszywa grubego, uzyskuje się zdecydowanie różne tempo podciągania kapilarnego w poszczególnych kompozytach wykonanych na bazie tych samych składników.

Wykazano, że pierwszy z wymienionych powyżej czynników, a więc ilość wstępnej wilgoci w kruszywie lekkim, przyczynia się do wystąpienia znacznych różnic w szybkości pochłaniania wody, szczególnie w trakcie pierwszych 12 godzin od zainicjowania kontaktu powierzchni próbek z cieczą. Przy czym beton, do produkcji którego wykorzystano keramzyt w stanie suchym, charakteryzuje się najmniejszą dynamiką omawianego procesu, stąd średni współczynnik sorpcji  $A$  w przypadku jego próbek wyniósł zaledwie  $0,9 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{1/2})$  przy stosunku zaprawy do kruszywa równym 1:1 oraz  $1,6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{1/2})$  przy stosunku 3:2.



Najmniej korzystny z uwagi na możliwości blokowania kapilarnego wnikania wody okazał się beton wykonywany na kruszywie w stanie powietrzno-suchym, wykazujący się najwyższymi współczynnikami sorpcji, wynoszącymi  $1,9 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{1/2})$  przy stosunku zaprawy do kruszywa 1:1 oraz  $2,4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{1/2})$  przy stosunku 3:2.

Przeprowadzone badania dowiodły także znacznego zróżnicowania uzyskiwanych równowagowych akumulacyjnościach kapilarnych, przy czym najniższymi wartościami odznaczały się kompozyty wykonane na bazie kruszywa suchego.

Zebrane wyniki wskazują ponadto na występowanie jednoznacznej tendencji związanej z różnym objętościowym udziałem poszczególnych składników – w każdym z trzech testowanych stanów wilgotnościowych kruszywa wyraźnie większą dynamikę procesu podciągania wykazywały próbki betonów wykonanych przy założeniu stosunku zaprawy do kruszywa keramzytowego 3:2. W efekcie w betonach tego rodzaju intensywniej będzie wprowadzana woda do ich wnętrza, a wraz z nią ewentualne substancje korozyjne. Skutkować to będzie obniżeniem trwałości i mrozoodporności elementów budowlanych wykonanych według tej technologii.

Przeprowadzone badania testujące pozwalają stwierdzić, iż niezależnie od zastosowanego stosunku składników, najskuteczniej blokuje podciąganie kapilarne beton wykonany na bazie keramzytu pozbawionego wilgoci. Dodatkowo intensywność procesu podciągania kapilarnego można ograniczyć zmniejszając udział objętościowy zaprawy w stosunku do kruszywa grubego. Maleje w tym przypadku znacząco zarówno tempo procesu wyrażone w wartości współczynnika A (o około 45%), jak i chłonność kapilarna (o około 30%).

## Literatura

- [1] Alsbry A.: Transport wilgoci w przegrodach budowlanych z materiałów kapilarnoporowatych, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2011.
- [2] Domagała L.: Konstrukcyjne lekkie betony kruszywowe, Politechnika Krakowska, Kraków 2014.
- [3] Ganter E., Chojczak W.: Materiały budowlane. Spoiwa, kruszywa, zaprawy, betony. Ćwiczenia laboratoryjne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [4] Garbalińska H.: Izotermiczne współczynniki transportu wilgoci porowatego materiału budowlanego, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2002.
- [5] Klemm P. i in.: Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli, Arkady, Warszawa 2005.
- [6] Narodowska K.: Badania i analiza wybranych właściwości betonów lekkich wykonanych na kruszywie keramzytowym. Praca dyplomowa inżynierska realizowana pod kierunkiem H. Garbalińskiej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, czerwiec 2015.
- [7] PN-EN ISO 9346 (2009): Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków i materiałów budowlanych. Wielkości fizyczne dotyczące przenoszenia masy. Słownik.

## INFLUENCE OF MIX COMPOSITION AND INITIAL MOISTNESS OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE ON CAPILLARY SORPTION OF EXPANDED CLAY AGGREGATE CONCRETE

### Summary

This paper presents the results of capillary porosity tests carried out using six expanded clay aggregate concretes, made from the same ingredients. Each aggregate was manufactured with the same type of Portland cement 42.5 R, potable mains water, expanded clay aggregate (4–8mm), and quartz sand (0–2mm). The effect of coarse aggregate humidity on the mixture was examined using dry (S), air-dry (P) and fully saturated (N) aggregates. Additionally, the mixtures had different volume ratios of lightweight aggregate and cement mortar. Ratios of 1:1 and 3:2 of cement mortar and expanded clay aggregate were used. Consequently, tests were carried out using 6 mixture types labelled S 1:1, P 1:1, N 1:1 and S 3:2, P 3:2, N 3:2. The results confirmed that these concretes had significantly different rates of capillarity and water absorption coefficients due to capillarity. The best results were obtained from concretes made using the dry aggregate with a 1:1 ratio of mortar and aggregate. This concrete had the lowest coefficient of  $A = 0.882 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$ . This type of concrete should most efficiently prevent water absorption and, as a consequence, ensure the highest resistance to corrosive substances carried by water, as well as the highest freeze-thaw resistance. The least favourable were expanded clay aggregate concretes with a large volume of mortar, namely a 3:2 ratio of cement mortar and expanded clay aggregate. For aggregates saturated with water (N) and aggregate particles dried on the surface (P), the A coefficient was 2.5 and 2.8 times higher with respect to the S 3:2 mixture.

**Keywords:** lightweight concrete, capillarity, water sorption coefficient, moisture of lightweight aggregate

*Przesłano do redakcji: 25.05.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Jacek SZTUBECKI<sup>1</sup>  
Adam BUJARKIEWICZ<sup>2</sup>  
Rafał TEWS<sup>3</sup>  
Paulina BRUNKA<sup>4</sup>

## BADANIA ODKSZTAŁCEŃ WIEŻY TELEKOMUNIKACYJNEJ PODDANEJ WPŁYWOWI NASŁONECZNIENIA

Badania zachowania się konstrukcji inżynierskich metodami geodezyjnymi polegają na wyznaczeniu przemieszczeń konstrukcji względem przyjętego układu odniesienia lub na określeniu geometrii poszczególnych elementów konstrukcyjnych lub całej konstrukcji. Dają one obraz zmian konstrukcji pomiędzy przyjętymi momentami czasu. Pomiar geometrii obiektów wieżowych wykonuje się cyklicznie wyznaczając jej odstępstwa od geometrii teoretycznej. Pomiary takie wykonuje się w warunkach optymalnych, w których na konstrukcję nie powinna działać żadna dodatkowa siła mogąca zniekształcać wyniki. Dla wież telekomunikacyjnych wynikami badania geometrii są zazwyczaj odchylenie osi wieży oraz kąty skrętu wieży na poszczególnych jej poziomach.

W artykule pokazano wyniki badania geometrii wieży telekomunikacyjnej uzyskane dla trzech stanów jej nasłonecznienia oraz porównano je z wynikami uzyskanymi z pomiaru w warunkach całkowitego zachmurzenia.

**Słowa kluczowe:** pomiar przemieszczeń, dynamika konstrukcji wieżowych

### 1. Wprowadzenie

Stal jest materiałem konstrukcyjnym stosowanym w budownictwie wszędzie tam, gdzie obiekty narażone są na działanie znacznych obciążeń statycznych i dynamicznych. Charakteryzuje się dobrymi właściwościami mechanicz-

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Jacek Sztubecki, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy; Zakład Geomatyki i Gospodarki Przestrzennej, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz; tel. 661567541; jaceksz@utp.edu.pl

<sup>2</sup> Adam Bujarkiewicz, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy; Zakład Geomatyki i Gospodarki Przestrzennej, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz; adamb@utp.edu.pl

<sup>3</sup> Rafał Tews, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy; Katedra Konstrukcji Budowlanych, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz; rtews74@utp.edu.pl

<sup>4</sup> Paulina Brunka, absolwentka Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

nymi, tj. dużą wytrzymałością, sprężystością oraz plastycznością. Stosując odpowiedni dobór charakterystyk przekroju poprzecznego uzyskać można lekkie konstrukcje o dużych rozpiętościach [5].

Wieża jest wysoką budowlą, najczęściej ukształtowaną pionowo, która pod względem statycznym jest wspornikiem zamocowanym sztywno w podstawie. Jej cechą charakterystyczną jest duży stosunek wysokości do uśrednionego wymiaru przekroju poprzecznego [5]. Wyróżnić można wiele rodzajów wież, m.in. stalowe - antenowe, energetyczne, kominowe, oświetleniowe, widokowe, odgromowe [5], a także takie, które są obiektami sakralnymi, obronnymi czy użytkowymi (np. wieże ciśnień).

Konstrukcje stalowe wież należy wykonywać zgodnie z postanowieniami i zaleceniami obowiązujących norm [4], a odchyłki ich montażu nie powinny przekraczać wartości granicznych [3]. Geometryczne odstępstwa od projektu wykonania i montażu lub też uszkodzenia eksploatacyjne wież mają wpływ na stopień bezpieczeństwa ich użytkowania. Zgodnie z instrukcją branżową [2], odchylenia osi trzonu wieży od pionu większe od  $L/750$ , gdzie  $L$  jest długością pomiarową, zalicza się do wad zagrażających bezpieczeństwu konstrukcji i wymagających niezwłocznej naprawy. Natomiast odchylenia większe od  $L/1000$  należą do wad pogarszających stan konstrukcji, których naprawę należy przeprowadzić w ciągu roku. Prowadzone pomiary odchylenia osi trzonów wież od prostoliniowości i pionowości wykazują bardzo często znaczne przekroczenie normowych wartości odchyłek dopuszczalnych [7]. Wyniki wielu badań diagnostycznych [1, 6], prowadzonych dla konstrukcji wieżowych, pozwoliły zidentyfikować szereg przyczyn pogorszenia ich stanu technicznego. Do czynników, które mają największy wpływ na odchylenie osi wież od linii pionu, zaliczyć można:

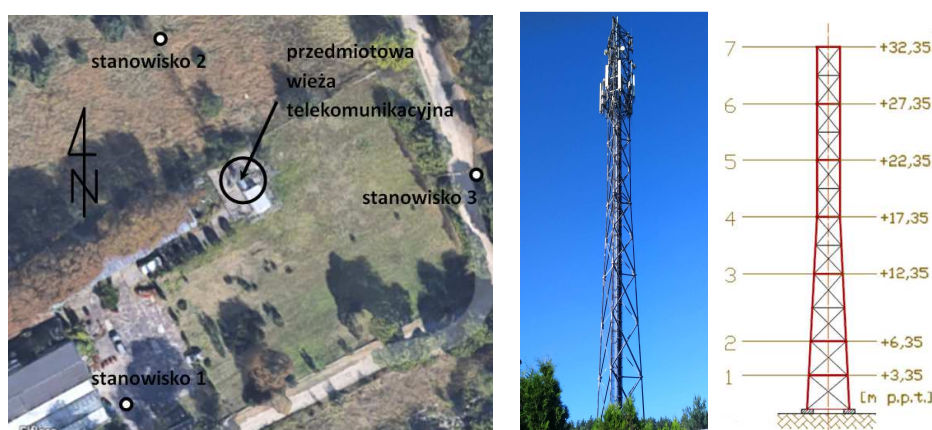
- imperfekcje geometryczne (wady konstrukcyjne),
- wady wykonawstwa,
- nierównomierność osiadania fundamentów,
- parcie wiatru na konstrukcję,
- wpływ nasłonecznienia na konstrukcję.

Odchylenia osi wież prowadzi się wykonując pomiary w optymalnych warunkach i minimalizując w ten sposób wpływ czynników zewnętrznych. Jednym z nich czynników jest nasłonecznienie, powodujące nagrzewanie się konstrukcji. Zalicza się go do czynników dynamicznych, a jego maksymalne oddziaływanie na konstrukcję zachodzi w okresie letnim, kiedy występują największe amplitudy temperatury.

W przeprowadzonych badaniach postanowiono podjąć próbę oszacowania wpływu tego czynnika na konstrukcję. Przedstawiono wyniki oraz analizę pomiarów wieży telekomunikacyjnej poddanej wpływowi nasłonecznienia, porównując je z wynikami pomiarów wykonanych w warunkach optymalnych. Przedmiotem badań jest wieża telekomunikacyjna, na której zamocowane są anteny nadawcze i odbiorcze, np. radiowe, telewizyjne czy telefoniczne [5].

## 2. Charakterystyka obiektu badań

Przedmiotem przeprowadzonych badań jest wieża telekomunikacyjna znajdująca się przy ul. Suchej 30 w Bydgoszczy. Jest ona stacją bazową telefonii komórkowej, oznaczoną, zgodnie z projektem budowlanym, jako „BT44859\_Fordon\_Sucha”. Lokalizację oraz widok wieży przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Lokalizacja, widok wieży telekomunikacyjnej oraz schemat rozmieszczenia jej segmentów  
Fig. 1. The location, view and scheme of arrangement telecommunication tower segments

Trzon wieży stanowi kratownica przestrzenna o całkowitej wysokości równej 32,00 m. Budowla jest złożona z 6 segmentów – dwóch po 6,00 m oraz czterech po 5,00 m. Zbieżność stacji bazowej do wysokości 17,00 m wynosi  $2,86^\circ$ . Konstrukcja jest opisana w rzucie na płanie trójkąta równobocznego. W narożach wieży rozmieszczone są krawężniki w postaci prętów okrągłych pełnych. Ściany wieży składają się z dwunastu skratowanych pól, licząc od węzła do węzła na krawężnikach. W miejscu połączenia fundamentu z elementami stalowymi, na wysokości +0,35 m, osie krawężników oddalone są o 3,70 m. Kolejne wysokości oraz odległości pomiędzy osiami krawężników wynoszą odpowiednio: +3,35 m - 340 cm; +6,35 m - 310 cm; +12,35 m - 250 cm, od +17,35 m do +32,35 m - 200 cm.

## 3. Metody badawcze i wyniki badań

W celu przeprowadzenia badań, na przedłużeniu ramion wieży zastabilizowano trzy stanowiska pomiarowe, z których mierzono wartości przemieszczeń krawężników wieży na poszczególnych poziomach. Z powodu braku widoczności posadowienia wieży w trakcie wykonywania pomiarów, za poziom odniesienia przyjęto poziom 1. Rozmieszczenie stanowisk pomiarowych pokazano na Rys. 1. Pomiar geometrii wieży wykonywano dwiema metodami: kątową i rzu-

towania, wykorzystując tachimetr IS-303 firmy Topcon. Wykorzystując uśrednione z obu metod wartości pomierzonych przemieszczeń  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  (Rys. 2) krawężników znajdujących się na poszczególnych poziomach, obliczono kąty skręcenia trzonu wieży oraz wychylenia wypadkowe osi wieży.

Obliczenia dla każdego poziomu wieży realizowane były z wykorzystaniem następujących wzorów [7]:

- wartości wychyleń składowych  $x$ ,  $y$ :

$$x = (D_2 - D_3) \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot D_1 - D_2 - D_3) \quad (2)$$

- wartości odchylen wypadkowych  $w$ :

$$w = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (3)$$

- wartości kątów skręcenia wieży  $\alpha$ :

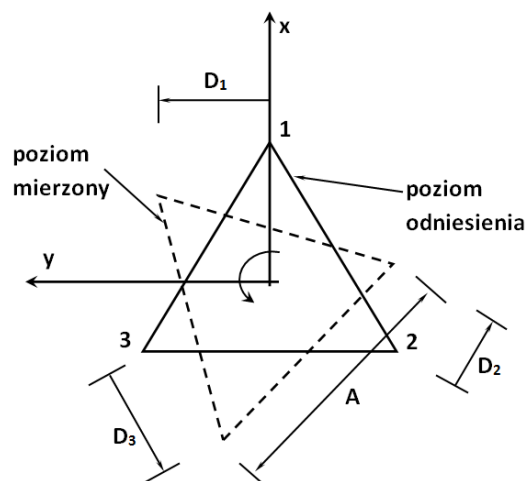
$$\alpha = \arcsin e \quad (4)$$

gdzie:

$$d = \frac{1}{3} \cdot (D_1 + D_2 + D_3) \quad (5)$$

$$e = \frac{d \cdot \sqrt{3}}{A} \quad (6)$$

$A$  – długość boku wieży.



Rys. 2. Układ współrzędnych wykorzystywany przy obliczeniach odchylen wieży

Fig. 2. Coordinate system used to calculate tower deviations

Przeprowadzono cztery serie pomiarowe. Trzy z nich wykonano w dniu 26.08.2016 r., przy pełnym nasłonecznieniu i wysokiej temperaturze, a czwartą w dzień zachmurzony 21.11.2016 r. Każdy z pomiarów trwał około 2 godzin. Pomiary przeprowadzono przy bezwietrznej pogodzie. Szczegóły dotyczące warunków temperaturowych oraz czas trwania każdej serii pomiarowych przedstawiono w Tab. 1.

Tabela. 1. Szczegóły serii pomiarowych wieży

Table 1. Details of tower measurement series

Data pomiaru	Godzina rozpoczęcia	Godzina zakończenia	Temp. powietrza [°C]	Temp. Konstrukcji [°C]
2016.08.21	8.30	10.25	21,8	23,7
	13.10	15.55	30,8	41,4
	16.20	18.15	29,9	32,3
2016.11.03	8.50	11.30	10,0	9,7

Wyniki pomiarów uzyskane z obu metod zostały uśrednione. Na ich podstawie obliczono wartości wychyleń oraz kąty skręcenia wieży. Do wykonania obliczeń przyjęto, pokazany na Rys. 2, kartezjański układ współrzędnych.

Wyniki oraz graficzną prezentację wychyleń oraz kątów skręcenia wieży dla poszczególnych serii przedstawiają tabele (Tab. 2 ÷ Tab. 5) i wykresy (Rys. 3 ÷ Rys. 6).

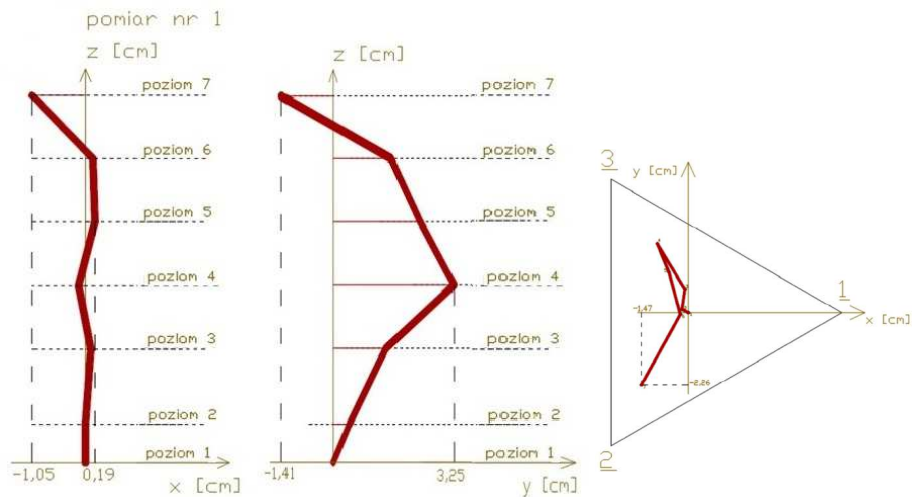
Dla pomiaru 1 (Rys. 3) największe wychylenie osi wieży w kierunku osi x wystąpiło dla poziomu 7 (-1,05 cm), natomiast względem osi y - dla poziomu 4 (+3,25 cm). Maksymalne wychylenie wypadkowe występuje dla poziomu 4 (+3,26 cm), a maksymalny kąt skręcenia wieży wystąpił na poziomie 7 i wyniósł  $-0,80^{\circ}$ .

Dla pomiaru 2 (Rys. 4) największe wychylenia osi wieży w kierunkach osi x i osi y wystąpiły dla poziomu 7 i wyniosły odpowiednio -1,47 cm oraz -2,26 cm. Maksymalne wychylenie wypadkowe wystąpiło dla poziomu 7 (+2,69 cm), a maksymalny kąt skręcenia wieży wystąpił również na poziomie 7 i wyniósł  $-1,39^{\circ}$ .

Tabela. 2. Wyniki wychyleń i skręcenia wieży dla pomiaru 1

Table 2. Deflections and twisting of the tower for measurement 1

Poziom	Nr celu	2016.08.26 - pomiar 1				
		D	x	y	w	$\alpha$
		[cm]				[°]
1	1.1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2.1	0,00				
	3.1	0,00				
2	1.2	0,31	0,01	0,42	0,42	-0,03
	2.2	-0,32				
	3.2	-0,33				
3	1.3	2,01	0,11	1,41	1,42	0,21
	2.3	-0,01				
	3.3	-0,20				
4	1.4	3,05	-0,13	3,25	<b>3,26</b>	-0,09
	2.4	-1,95				
	3.4	-1,72				
5	1.5	1,66	0,19	2,35	2,36	-0,30
	2.5	-1,70				
	3.5	-2,02				
6	1.6	0,26	0,15	1,56	1,56	-0,57
	2.6	-1,94				
	3.6	-2,21				
7	1.7	-3,22	-1,05	-1,41	1,75	-0,80
	2.7	-2,02				
	3.7	-0,21				



Rys. 3. Wykresy wychyleń wieży dla pomiaru 1

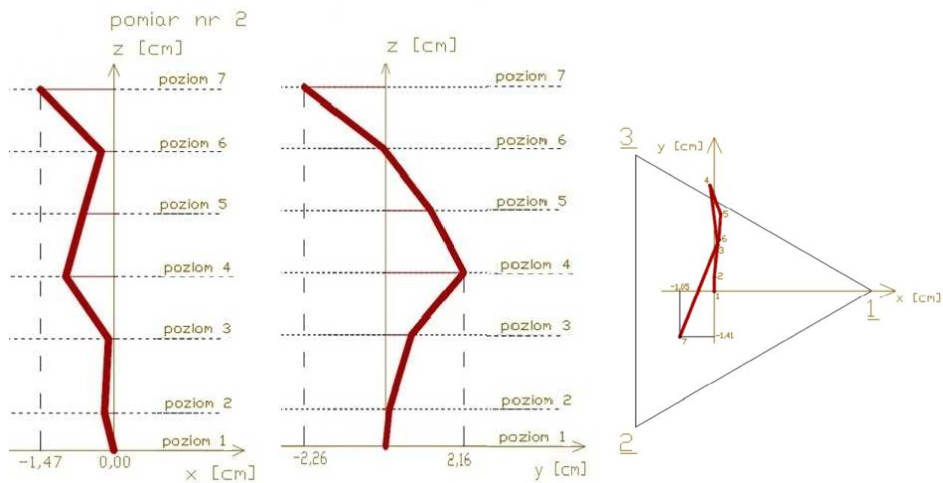
Fig. 3. Graphs of tower deflection in measurement 1



Tabela 3. Wyniki wychyleń i skręcenia wieży dla pomiaru 2

Table 3. Deflections and twisting of the tower for measurement 2

Poziom	Nr celu	2016.08.26 - pomiar 2				
		D	x	y	w	$\alpha$
		[cm]				[°]
1	1.1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2.1	0,00				
	3.1	0,00				
2	1.2	0,31	-0,19	0,10	0,22	-0,02
	2.2	-0,32				
	3.2	-0,33				
3	1.3	2,01	-0,10	0,73	0,74	0,12
	2.3	-0,01				
	3.3	-0,20				
4	1.4	3,05	-0,97	2,16	2,37	-0,05
	2.4	-1,95				
	3.4	-1,72				
5	1.5	1,66	-0,61	1,27	1,41	-0,62
	2.5	-1,70				
	3.5	-2,02				
6	1.6	0,26	-0,25	-0,06	0,26	-0,91
	2.6	-1,94				
	3.6	-2,21				
7	1.7	-3,22	-1,47	-2,26	<b>2,69</b>	-1,39
	2.7	-2,02				
	3.7	-0,21				



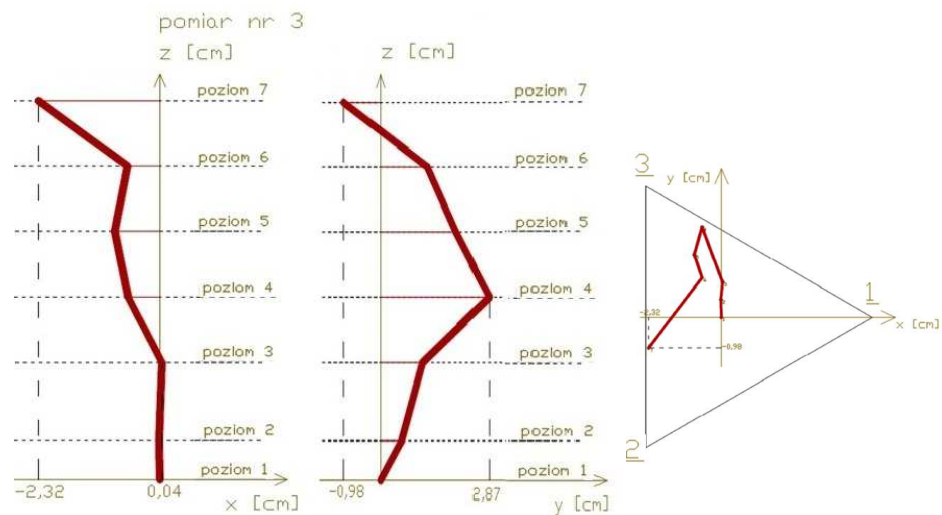
Rys. 4. Wykresy wychyleń wieży dla pomiaru 2

Fig. 4. Graphs of tower deflection in measurement 2

Tabela. 4. Wyniki wychyleń i skręcenia wieży dla pomiaru 3

Table 4. Deflections and twisting of the tower for measurement 3

Poziom	Nr celu	2016.08.26 - pomiar 3				
		D	x	y	w	$\alpha$
		[cm]				
1	1.1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2.1	0,00				
	3.1	0,00				
2	1.2	0,31	-0,01	0,56	0,56	0,00
	2.2	-0,32				
	3.2	-0,33				
3	1.3	2,01	0,04	1,11	1,11	0,20
	2.3	-0,01				
	3.3	-0,20				
4	1.4	3,05	-0,61	2,87	<b>2,93</b>	-0,09
	2.4	-1,95				
	3.4	-1,72				
5	1.5	1,66	-0,86	1,99	2,16	-0,49
	2.5	-1,70				
	3.5	-2,02				
6	1.6	0,26	-0,62	1,24	1,38	-0,76
	2.6	-1,94				
	3.6	-2,21				
7	1.7	-3,22	-2,32	-0,98	2,52	-1,16
	2.7	-2,02				
	3.7	-0,21				



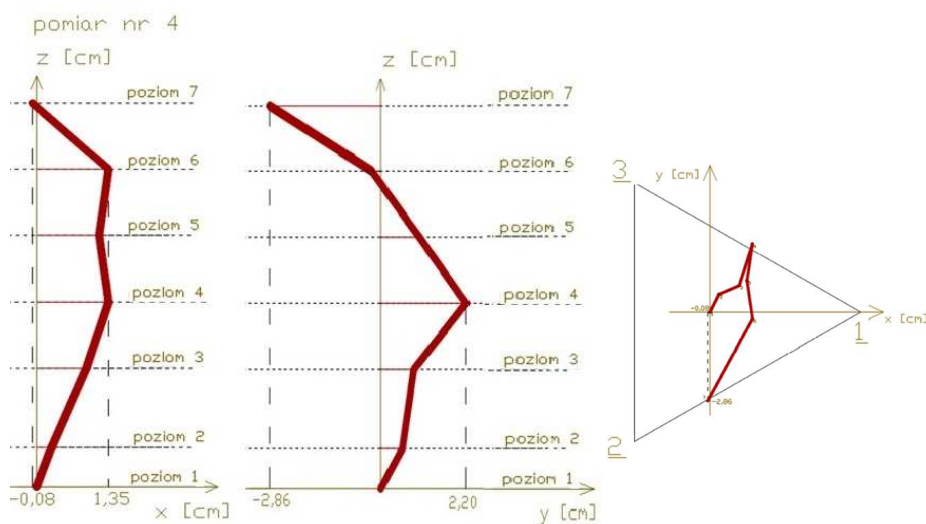
Rys. 5. Wykresy wychyleń wieży dla pomiaru 3

Fig. 5. Graphs of tower deflection in measurement 3

Tabela 5. Wyniki wychyleń i skręcenia wieży dla pomiaru 4

Table 5. Deflections and twisting of the tower for measurement 4

Poziom	Nr celu	2016.11.03 - pomiar 4				
		D	x	y	w	$\alpha$
		[cm]				[°]
1	1.1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2.1	0,00				
	3.1	0,00				
2	1.2	0,31	0,28	0,56	0,62	0,09
	2.2	-0,32				
	3.2	-0,33				
3	1.3	2,01	0,93	0,85	1,26	0,29
	2.3	-0,01				
	3.3	-0,20				
4	1.4	3,05	1,35	2,20	2,58	0,09
	2.4	-1,95				
	3.4	-1,72				
5	1.5	1,66	1,18	1,00	1,54	-0,20
	2.5	-1,70				
	3.5	-2,02				
6	1.6	0,26	1,35	-0,22	1,37	-0,41
	2.6	-1,94				
	3.6	-2,21				
7	1.7	-3,22	-0,08	-2,86	<b>2,86</b>	-0,55
	2.7	-2,02				
	3.7	-0,21				



Rys. 6. Wykresy wychyleń wieży dla pomiaru 4

Fig. 6. Graphs of tower deflection in measurement 4

Dla pomiaru 3 (Rys. 5) największe wychylenie osi wieży w kierunku osi x wystąpiło dla poziomu 7 (-2,32 cm), a względem osi y - dla poziomu 4 (+2,87 cm). Maksymalne wychylenie wypadkowe zaobserwowano dla poziomu 4 (2,93 cm), a maksymalny kąt skręcenia wieży wystąpił na poziomie 7 i wyniósł  $-1,16^{\circ}$ .

Dla pomiaru 4 (Rys. 6) największe wychylenie osi wieży w kierunku osi x wystąpiło dla poziomu 6 i wyniosło 1,35 cm, a względem osi y - dla poziomu 7 i wyniosło -2,86 cm. Maksymalne wychylenie wypadkowe występuje dla poziomu 7 i wynosi 2,86 cm, a maksymalny kąt skręcenia wieży wystąpił na poziomie 7 i wyniósł  $-0,55^{\circ}$ .

Należy nadmienić, że wyznaczone wartości wychyleń i kątów skrętu wieży odniesione są do poziomu 1, znajdującego się na wysokości 3,35m nad poziomem posadowienia.

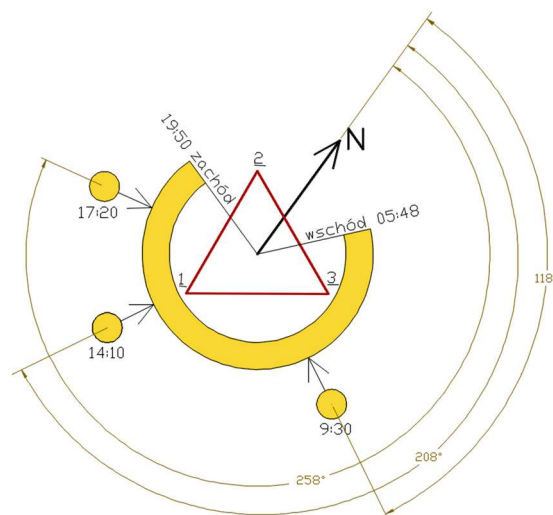
#### 4. Analiza wyników badań

Na podstawie wyników badań zauważyć można, że przyjmując kryterium  $L/1000$ , maksymalne wartości wychyleń wypadkowych wieży są na granicy wychyleń dopuszczalnych. Rozpatrując wychylenie względem przyjętej osi y, widać zmianę kierunku wychylania się wieży dla poziomów wyższych niż 4 (w stosunku do poziomów niższych), a poziomy 4 i najwyższy (7) wykazują największe wartości wychyleń wypadkowych.

W celu przeprowadzenia analizy uzyskanych wyników, dla pomiarów wykonanych przy pełnym nasłonecznieniu (2016.08.26), niezbędne było ustalenie azymutów padania słońca na konstrukcję. Wartości te wyznaczono dla środkowego momentu trwania każdej z trzech serii pomiarowej. Azymuty te wyniosły odpowiednio: dla pomiaru nr 1 -  $118^{\circ}$ , dla pomiaru nr 2 -  $208^{\circ}$ , dla pomiaru nr 3 -  $258^{\circ}$ . Kierunki padania promieni słonecznych w stosunku do położenia wieży pokazano na Rys. 7. Z kątów tych wynika, że w trakcie pomiaru drugiego, w którym oddziaływanie słońca na konstrukcję jest największe, promienie słoneczne padają na ramię nr 1 wieży.

Dlatego w analizie wpływu nasłonecznienia na badaną wieżę przyjęto taki układ współrzędnych, którego jedna z osi (w analizowanym przypadku oś x) jest w przybliżeniu równoległa do padania promieni słonecznych w momencie maksymalnego ich oddziaływania. Położenie i orientację osi układu współrzędnych zastosowanego w badaniach przedstawiono na Rys. 2.

Zauważyć można, że wierzchołek wieży, wraz ze wzrostem temperatury konstrukcji, zmienia swoje położenie przeciwnie do kierunku osi x. Jego wychylenia w kolejnych pomiarach 1, 2, 3 wynoszą odpowiednio: -1,05 cm, -1,47 cm oraz -2,32 cm, co pokazuje, że bezwzględna zmiana wychyleń wierzchołka wieży spowodowana zmianą temperatury konstrukcji wynosi 1,27 cm. W pomiarze 4 (jesiennym) wartość wychyleń wierzchołka po osi x wynosiła 0,08 cm, więc wychylenie wierzchołka wieży dla pomiaru 3, względem pomiaru 4, wynosi 2,40 cm, co jest wychyleniem bliskim dopuszczalnego.



Rys. 7. Azymuty padania promieni słonecznych na wieżę

Fig. 7. Azimuth of the solar radiation on the tower

Zmiana temperatury konstrukcji wpłynęła również na zmianę kąta skrętu wieży. Maksymalne skręty w pomiarach 1,2,3 zanotowano dla poziomu 7 i wyniosły odpowiednio  $-0,80^{\circ}$ ,  $-1,39^{\circ}$ ,  $-1,16^{\circ}$ , natomiast skręt wieży dla pomiaru 4 (jesiennego) wyniósł  $-0,55^{\circ}$ . Kąt skrzywienia wieży dla pomiaru 2 ( $-1,39^{\circ}$ ), w przeliczeniu na odległość kątową talerzyka poziomu 7, wynosi  $2,52$  cm, natomiast odległość kątowna, obliczona na podstawie różnicy kątów skrzywienia pomiędzy pomiarami 2 i 4 ( $-0,83^{\circ}$ ), wynosi  $1,51$  cm.

## 5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wpływu nasłoneczniania na wieżę telekomunikacyjną wyciągnąć można następujące wnioski:

- 1) Uzyskane wartości wychyleń wypadkowych dla analizowanej wieży są bliskie wartościom dopuszczalnym (przyjmując kryterium  $L/1000$ ).
- 2) Analiza wyników pomiarów wykazała istotny wpływ nasłonecznienia konstrukcji na zmianę wychyleń osi wieży.
- 3) Dla analizowanej wieży oddziaływanie promieni słonecznych nie wpłynęło znacząco na zmianę wartości maksymalnych wychyleń wypadkowych. Nie można jednak tego uogólnić na inne wieże tego typu.
- 4) Zmiana wychyleń wieży, spowodowana wpływem nasłonecznienia, w stosunku do pomiaru przeprowadzonego w warunkach optymalnych, wynosiła  $2,40$  cm. Stanowi to około  $80\%$  wychyleń dopuszczalnego, zatem wychylenia wieży spowodowane czynnikiem nasłonecznienia powinno być uwzględniane na etapie ich projektowania.

- 5) Zaobserwowano istotny wpływ nasłonecznienia konstrukcji wieży na jej obrót względem osi. Największe wartości skręcania występują w wierzchołku wieży. Może to być efekt nierównomiernych zmian długości krawężników, które w różny sposób wystawione są na działanie promieni słonecznych.
- 6) Kontynuacja badań obejmować będzie analizy wpływu odchyleń i skręceń wież, spowodowanych czynnikiem nasłonecznienia na jakość sygnału przesyłanego i odbieranego przez umieszczone na nich anteny.

## Literatura

- [1] Hulimka J., Skwarek M., Dyrek M.: Błędy w projektowaniu, wykonawstwie i utrzymaniu wieży telekomunikacyjnej o wysokości 50 m. XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary budowlane 2007”. Szczecin-Międzyzdroje, maj 2007, s. 585-592.
- [2] Instrukcja ER-01. Eksploatacja wież i masztów. Załącznik do zarządzenia nr 31 Prezesa Zarządu TP SA z dnia 30.06.1994 r., Warszawa 1994.
- [3] PN-ISO 1803:2001 Budownictwo - Tolerancje - Wyrażanie dokładności wymiarowej - Zasady i terminologia.
- [4] PN-EN 1993-3-1:2008 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.
- [5] Rykaluk K.: Konstrukcje stalowe. Kominy, wieże, maszty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [6] Wichtowski B.: Geometria stalowych wież i masztów radiowo-telewizyjnych na podstawie inspekcji okresowych. Budownictwo PN PS, nr 561/2002.
- [7] Wichtowski B.: Rektyfikacja stalowych wież antenowych na podstawie inspekcji okresowych, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin-Międzyzdroje, maj 2007, s. 665-672.

## STUDY OF THE TELECOMMUNICATION TOWER DEFORMATION EXPOSED TO SUNLIGHT

### Summary

The research on behavior of the engineering structures by geodetic methods consists in determining the displacement of the structure with respect to the adopted reference system or determining the geometry of individual structural elements or the entire object. They give a view on the changes of structure between the times. Measurement of the tower objects geometry is done cyclically, determining its deviation from the theoretical geometry. Such measurements shall be performed under optimum conditions in which none additional force capable of distorting results shall be allowed on the structure. For telecommunication towers, the axle deviation from the vertical and the angles of rotation at the individual levels are usually tested.

The paper presents the survey results of the telecommunication tower geometry for the three states of its insolation which have been compared with the results obtained from the measurement in the conditions of total cloudiness.

**Keywords:** displacements measurement, dynamics of tower constructions

*Przesłano do redakcji: 19.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Marcin MALINOWSKI<sup>1</sup>

## DOKŁADNOŚĆ WYZNACZANIA POZYCJI Z ZASTOSOWANIEM PERMANENTNYCH USŁUG INTERNETOWYCH PPP (PRECISE POINT POSITIONING)

Precyzyjne pozycjonowanie PPP to metoda wyznaczania pozycji przy pomocy samodzielnego odbiornika GNSS. Może stanowić alternatywną technikę do pomiarów różnicowych gdzie niezbędnym jest utrzymanie łączności z pojedynczą stacją RTK lub regionalną siecią stacji referencyjnych RTN. Metoda precyzyjnego pomiaru PPP może w szczególności sprawdzić się w obszarach o słabo rozwiniętej infrastrukturze stacji naziemnych. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy dokładności precyzyjnego wyznaczania pozycji na wierzchołkach trójkątnej osnowy dla obserwacji trwających od 0,5 do 6 godzin z wykorzystaniem bezpłatnych permanentnych usług internetowych realizujących obliczenia techniką PPP jak: APPS, CSRS-PPP, magicGNSS. Dla każdego punktu osnowy pomiarowej wykonano obliczenia wykorzystując obserwacje GPS i uwzględniając produkty Final. Wykonano ocenę wpływu dokładności jednoczesnego pozycjonowania trzech punktów osnowy pomiarowej na zmianę odległości zredukowanej i wysokości względnej między wierzchołkami badanego trójkąta osnowy.

**Słowa kluczowe:** GPS, APPS, CSRS-PPP, GMV, magicGNSS

### 1. Wprowadzenie

Precise Point Positioning (PPP) to technika satelitarnego precyzyjnego pozycjonowania absolutnego, której najważniejszą zaletą jest możliwość wyznaczenia pozycji z dużą dokładnością za pomocą tylko jednego dwuczęstotliwościowego odbiornika GNSS przy jednoczesnym braku łączności z regionalną siecią lub pojedynczą stacją referencyjną [1-4, 6, 10-14]. Metoda precyzyjnego pomiaru PPP wyklucza konieczność utrzymania kosztownej regionalnej sieci stacji referencyjnych RTN oraz pozwala na wykonywanie pomiarów w obszarach o słabo rozwiniętej infrastrukturze naziemnej. Wysokie dokładności pozycjonowania możliwe są do uzyskania przy wykorzystaniu precyzyjnych produktów udostępnianych przez międzynarodową służbę IGS (International GNSS

---

<sup>1</sup> Marcin Malinowski, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. Śniadeckich, Katedra Geomatyki i Gospodarki Przestrzennej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz; marcinm@utp.edu.pl

Service), takich jak parametry: ruchu obrotowego Ziemi, zegarów satelitów oraz orbit satelitów. Jakość powyższych produktów pozwala służbie IGS na wypełnianie podstawowych zadań jak m.in. realizacja globalnego, precyzyjnego układu odniesienia, badania ruchu obrotowego Ziemi, ruchu biegunów i zjawisk pływowych, badania zmian poziomu mórz i oceanów, badania atmosfery (jonosfery i troposfery). Proces opracowywania precyzyjnych produktów IGS wspomaga ośrodek naukowy Jet Propulsion Laboratory, który jednocześnie udostępnia własne produkty dotyczące zegarów oraz orbit satelitów.

Służba IGS realizuje swoje zadania dzięki ok. 350 permanentnych stacji śledzących, globalnych i regionalnych centrów danych, licznych centrów analiz. Przy realizacji pomiarów techniką PPP chociaż nie jest wymagana łączność z regionalną siecią lub stacją referencyjną to niezbędnym jest dostęp do precyzyjnych produktów udostępnianych przez służbę IGS, a powstających w oparciu o globalną sieć permanentnych stacji śledzących.

Wysoką dokładność pozycjonowania w technice PPP uzyskuje się przez uwzględnienie szeregu dodatkowych danych i poprawek [5]. Najważniejsze znaczenie mają tu precyzyjne orbity i poprawki zegarów satelitów. Przy opracowywaniu pomiarów uwzględnia się także poprawkę jonosferyczną i troposferyczną, pływy oceanów i skorupy ziemskiej, położenie centrum fazowego anteny satelity i odbiornika oraz efekty wynikające z teorii względności.

Metoda obliczeniowa precyzyjnego pozycjonowania absolutnego jest dość dobrze opisana w literaturze [4, 5]. Oparta jest ona na obserwacjach kodowych jak i fazowych na obydwu częstotliwościach. Równania obserwacji kodowych i fazowych na częstotliwości L1 można zapisać w następujący sposób [4, 12, 13]:

$$P_{1,i}^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \delta O^k + \delta T_i^k + \delta I_i^k + \varepsilon \quad (1)$$

$$\Phi_{1,i}^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \delta O^k + \delta T_i^k - \delta I_i^k + \lambda_{L1} N_{L1,i}^k + \varepsilon \quad (2)$$

gdzie:

- $P_{1,i}^k$  – pseudoodległość od satelity k do odbiornika i na częstotliwości L1 [m],
- $\Phi_{1,i}^k$  – obserwacja fazowa odbiornika i od satelity k na częstotliwości L1 [m],
- $\rho_i^k$  – odległość geometryczna między satelitą k a odbiornikiem i [m],
- $\Delta t_i, \Delta t^k$  – błędy zegarów odbiornika i oraz satelity k [s],
- $\delta O^k$  – błąd orbity dla satelity k [m],
- $\delta T_i^k$  – opóźnienie sygnału spowodowane refrakcją troposferyczną [m],
- $\delta I_i^k$  – opóźnienie sygnału spowodowane refrakcją jonosferyczną [m],
- $N_{L1,i}^k$  – całkowita liczba pełnych odległości fal sygnału na L1, nieoznaczoność,
- $\lambda_{L1}$  – długość fali elektromagnetycznej na częstotliwości L1 [m],
- $c$  – prędkość światła w próżni [m/s],
- $\varepsilon$  – błędy przypadkowe [m].



Wielkości wyznaczone w procesie obliczeń to współrzędne odbiornika, błąd zegara odbiornika, opóźnienie troposferyczne oraz nieoznaczoność. Błąd efemeryd i błąd zegara satelity redukuje się korzystając np. z precyzyjnych produktów IGS. Błąd opóźnienia jonosferycznego najczęściej można wyeliminować stosując odbiorniki dwuczęstotliwościowe [4]. Zatem eliminację refrakcji jonosferycznej można osiągnąć przez zastosowanie kombinacji liniowej typu ionosphere-free dla obserwacji kodowych i fazowych. Natomiast opóźnienie troposferyczne nie zależy od częstotliwości sygnału GNSS, stąd jest traktowane jako dodatkowa niewiadoma [7]. Wyznaczenie liczby pełnych cykli fazowych sygnału GNSS czyli nieoznaczoności fazy jest niezwykle trudne w pomiarach bezwzględnych. Określenie wartości tej niewiadomej wymaga długotrwałych obserwacji [7, 8].

Opracowanie obserwacji satelitarnych techniką PPP można wykonać z pomocą specjalistycznego oprogramowania, którego przykładem jest Bernese GPS Software, EZSurv lub pakiet otwartego oprogramowania RTKLib. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie permanentnych usług internetowych wykonujących obliczenia techniką PPP (Tabela 1).

Tabela 1. Usługi on-line udostępniające obliczenia techniką PPP

Table 1. Online services for calculations using PPP

Skrót nazwy	Pełna nazwa usługi	Podmiot udostępniający usługę
CSRS-PPP	Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning	Natural Resources Canada (NRCan)
APPS	Automatic Precise Positioning Service	NASA – Jet Propulsion Laboratory (JPL)
GAPS	GNSS Analysis and Positioning Software	University of New Brunswick (UNB)
magicGNSS	magicPPP - Precise Point Positioning Solution	GMV Aerospace and Defence S.A.U. (GMV)

Wykaz w tabeli 1 otwiera usługa CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System), która pozwala na opracowanie danych w trybie statycznym i kinematycznym z wykorzystaniem precyzyjnych poprawek orbit i zegarów satelitów udostępnianych przez IGS. Obliczenia mogą być realizowane na podstawie obserwacji kodowych i fazowych z jednej lub dwóch częstotliwości. Jest możliwość określenia układu odniesienia NAD83 lub ITRF2008 dla wyznaczanych współrzędnych. Istnieje również możliwość dołączenia pliku z danymi o pływach oceanów. Do opracowania danych mogą być wykorzystane obserwacje z konstelacji GPS i GLONASS. Korzystanie z usługi wiąże się z koniecznością rejestracji.

Usługi APPS (Automatic Precise Positioning Service) i GAPS (GNSS Analysis and Positioning Software) mogą wykonywać obliczenia w trybie statycznym i kinematycznym. Usługa GAPS wymaga rejestracji, natomiast APPS nie stawia takiego wymogu. W przypadku usługi APPS wykonanie rejestracji po-

zwala dodatkowo na zmiany opcji przetwarzania obserwacji oraz zwiększenie limit przesyłanego pliku z 5 MB do 10 MB. Usługa GAPS korzysta z produktów Final, Rapid i Ultra-Rapid dla poprawek orbit i zegarów satelitów udostępnianych przez IGS i NRCan (Natural Resources Canada). Natomiast APPS używa produktów JPL (Jet Propulsion Laboratory) typu final, rapid i ultra-rapid dla poprawek orbit i zegarów satelitów. Osoby korzystające z usługi GAPS mogą przesłać plik z danymi o pływach skorupy ziemskiej i oceanów oraz plik z parametrami kalibracji anteny. Usługa APPS nie uwzględnia w obliczeniach parametrów centrum fazowego anteny. Użytkownicy APPS do opracowania danych mogą wykorzystać wyłącznie obserwacje z konstelacji GPS natomiast w przypadku usługi GAPS z konstelacji GPS, Galileo i BeiDou.

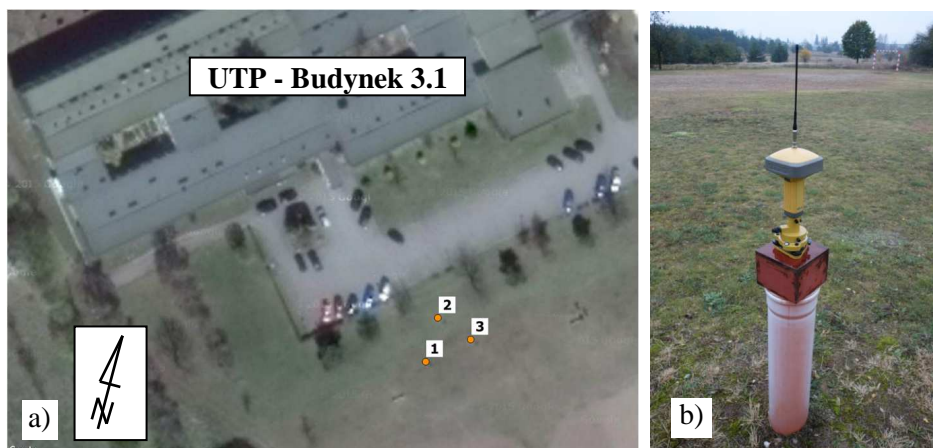
Usługa magicGNSS udostępniana jest za pośrednictwem interaktywnego portalu internetowego oraz e-maila. Pierwszy sposób komunikacji wymaga rejestracji. W trakcie obliczeń można przetwarzać dane zebrane w trybie statycznym i kinematycznym na dwóch częstotliwościach wykorzystując produkty final, rapid dla poprawek orbit i zegarów satelitów udostępnianych przez IGS i GMV. Do opracowania danych można wybrać obserwacje z konstelacji GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou i QZSS. Współrzędne obliczonej pozycji wyznaczone są w dwóch układach odniesienia ITRF2008 oraz ETRS89. Usługa nie uwzględnia w obliczeniach parametrów centrum fazowego anteny.

## 2. Metodyka badań

Celem badań terenowych była ocena dokładności wyznaczania pozycji wierzchołków trójkątnej osnowy pomiarowej z wykorzystaniem różnych usług PPP dostępnych w Internecie. Do realizacji obliczeń zastosowano trzy najważniejsze i ciągle rozwijane usługi opracowywania obserwacji GNSS z wykorzystaniem techniki PPP tj. APPS, CSRS-PPP, magicGNSS (Tab. 1). Usługę GAPS wykluczono z uwagi na liczne błędy w trakcie wykonywania obliczeń.

Uwzględniając dobre warunki widoczności satelitów nad horyzontem w niedalekim sąsiedztwie budynku 3.1 na terenie kampusu Uniwersytetu Techniczno-Przyrodniczego zostały założone trzy punkty osnowy pomiarowej (Rys. 1). Niezmiennosc pozycji każdego punktu osnowy zapewniono przy pomocy masywnego i głębokiego fundamentu, posadowionego poniżej głębokości przemarzania. Na szczycie słupa zakotwiono metalowy sześciąt z centralnym otworem 5/8" służącym do mocowania instrumentów pomiarowych.

Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano dwa odbiorniki GR-5 firmy Topcon oraz jeden Triumph-VS firmy Javad. W trakcie każdej sesji odbiorniki instalowano w jednakowej konfiguracji gdzie GR-5 ustawiano na punktach 1 i 3 natomiast Triumph-VS na punkcie 2. Pomiaru terenowe trwały przez 6 dni w formie 6 godzinnych sesji pomiarowych. W ten sposób każdego dnia powstawał zapis na 3 punktach co w sumie dało 18 sesji.



Rys. 1. Lokalizacja trzech punktów osnowy pomiarowej w pobliżu budynku 3.1 na terenie kampusu Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego (źródło ortofotomapy: Google Maps)

Fig. 1. Localization of: a) three points of geodesy test network in the vicinity of UTP Building 3.1. (Source: Google Maps); b) pole for attaching measurement instruments

Do obliczeń wykorzystano dane obserwacyjne z konstelacji GPS o interwale 1 sekundy. Obserwacje jako pomiary statyczne podczas sesji pomiarowych były rejestrowane w pamięci wewnętrznej odbiorników.

Proces opracowania danych rozpoczęto od konwersji plików sesji pomiarowych z binarnego formatu Javad (\*.jps) i Topcon (\*.tps) do uniwersalnego formatu wymiany danych RINEX 2.11. Następnie z pomocą specjalnie przygotowanych skryptów ze zgromadzonych pomiarów utworzono pliki obserwacyjne o długości: 0,5, 1, 2, 3 godzin. W rezultacie otrzymano 216 sesji półgodzinnych, 108 sesji jednogodzinnych, 54 sesje dwugodzinne i 36 sesji trzygodzinnych. Z uwagi na ograniczenie wielkości przesyłanych plików obserwacyjnych do 10MB dla usługi APPS przy pomocy skryptu utworzono pliki obserwacyjne z interwałem 5 sek. Parametry zastosowane w trakcie obliczeń przez poszczególne usługi PPP przedstawiono w tabeli 2.

Kolejnym krokiem opracowania była transformacja współrzędnych obserwowanego punktu z układu ITRF2008 do ETRF89, a następnie do układu współrzędnych płaskich 2000 w strefie 6 na podstawie [9]. Uwzględniono model centrum fazowego anteny w przypadku, gdy usługodawca metody PPP nie zastosował go w wynikach końcowych opracowania.

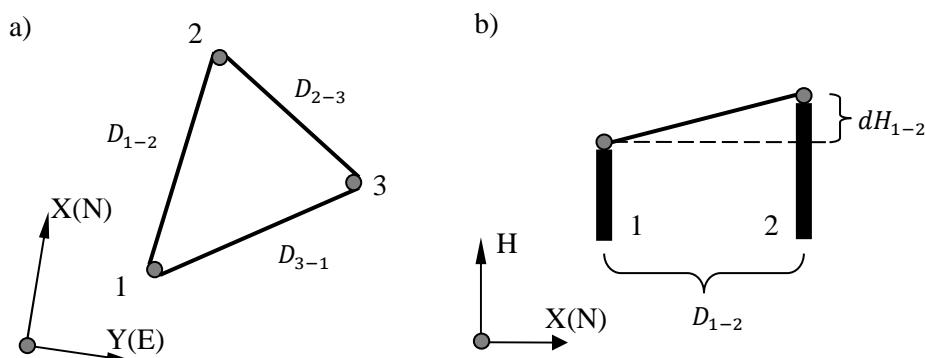
Dla każdego punktu osnowy pomiarowej wykonano obliczenia wykorzystując wyłącznie obserwacje GPS oraz uwzględniając produkty final. Uzyskane współrzędne porównano ze współrzędnymi referencyjnymi. Z uwagi na brak dobowych sesji pomiarowych do przeprowadzenia oceny dokładności pozycji pojedynczego punktu osnowy wykorzystano opracowanie obserwacji w trybie post-processingu z 6 najbliższych stacji referencyjnych sieci Leica SmartNet.

Tabela 2. Parametry przyjęte przez usługi on-line udostępniające obliczenia metodą PPP

Table 2. Parameters adopted by online services for calculations with PPP

Parametr	APPS	CSRS-PPP	magicGNSS
Wersja	v5	1.05 11216	?
Tryb obliczeń	static	static	static
Konstelacja	GPS	GPS	GPS
Częstotliwość	L1,L2	L1,L2	L1,L2
Rodzaj obserwacji	kodowe i fazowe	kodowe i fazowe	kodowe i fazowe
Model anteny	niewzględniony	uwzględniony	niewzględniony
Układ odniesienia	ITRF2008	ITRF2008	ITRF2008, ETRF89
Orbity i zegary satelitów	JPL Final	IGS Final	IGS Final
Pływy oceanów	tak	nie	tak
Pływy skorupy ziemskiej	tak	tak	tak
Odcięcie horyzontu	7,5°	10°	10°

Obliczenia wykonano przy pomocy oprogramowania EZSurv z wykorzystaniem najbliższych stacji referencyjnych, do których wyznaczone wektory spełniają kryteria dokładnościowe. Na podstawie wybranych punktów zrealizowano wyrównanie, którego wynikiem są współrzędne obserwowanego punktu w układzie ITRF2008. Następnie współrzędne poddano transformacji z układu ITRF2008 do ETRF89, a później do układu współrzędnych płaskich 2000 w strefie 6. W obliczeniach uwzględniono model centrum fazowego anteny. Porównanie wielkości pomierzonych z wielkościami referencyjnymi wykonano w układzie 2000. Metoda transformacji układów współrzędnych ma zbliżony wpływ na dokładność przeprowadzonych testów w punktach osnowy pomiarowej (rys. 2) z uwagi na rozmieszczenie ich w odległościach nieprzekraczających 12 m.



Rys. 2. Schemat lokalizacji punktów osnowy pomiarowej na: a) planie sytuacyjnym, b) przekroju między punktami 1-2

Fig. 2. Scheme of localization of points of geodesy test network on: a) horizontal plane, b) schematic cross-section between points 1 and 2

Po wykonaniu post-processingu przy obliczeniach uzyskano średnie błędy wyznaczenia składowych pozycji horyzontalnej w przedziale między  $m_p = 0,004$  m a  $m_p = 0,006$  m oraz wysokości w przedziale między  $m_H = 0,007$  m a  $m_H = 0,014$  m. Ponadto, analizie poddano średnie wartości odchyłek składowych pozycji od wielkości referencyjnych, ich odchyłki maksymalne oraz udział procentowy odchyłki w dopuszczalnym przedziale dla przebadanej próby.

Przeprowadzono również eksperyment, mający na celu określenie dokładności wyznaczania odległości zredukowanej i wysokości względnej między punktami osnowy pomiarowej. Za wielkości odniesienia przyjęto wykonane przy pomocy stacji laserowej Leica TDRA6000 pomiary odległości zredukowanej i wysokości względnej między punktami osnowy pomiarowej (Tab. 3). Analizie poddano średnie wartości odchyłek odległości i wysokości względnej od wielkości referencyjnych, ich odchyłki maksymalne oraz udział procentowy odchyłki w dopuszczalnym przedziale dla przebadanej próby.

Tabela 3. Wielkości referencyjne odległości zredukowanej na płaszczyznę poziomą i wysokości względnej między punktami osnowy pomiarzone przy pomocy stacji laserowej

Table 3. Reference values of reduced distance in a horizontal plane and the difference of height between points of test network measured by a laser station

Odległość zredukowana $D$ [m]			Wysokość względna $dH$ [m]		
1-2	2-3	3-1	1-2	2-3	3-1
10.113	8.727	11.234	0.537	-0.408	-0.129

### 3. Wyniki opracowania sesji obserwacyjnych

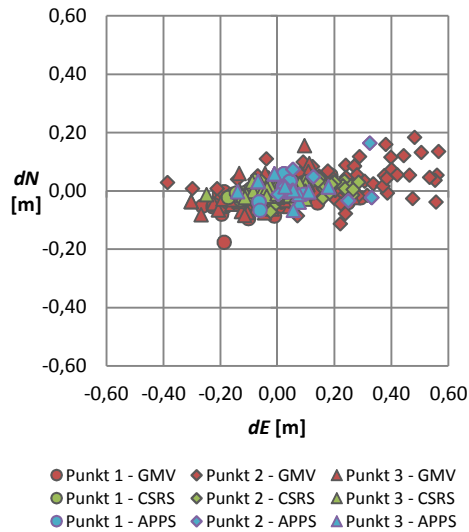
Wyniki obliczeń w postaci wartości odchyłek wypadkowej współrzędnych horyzontalnych  $NE$  pozycji na punktach osnowy pomiarowej dla sesji o długości 0.5, 1, 2, 3, 6 godz. przedstawiono odpowiednio na (Rys. 3, 5, 7, 9). Natomiast wartości odchyłek współrzędnej wysokości  $H$  pozycji na punktach osnowy pomiarowej dla sesji o długości 0.5, 1, 2, 3, 6 godz. przedstawiono odpowiednio na (Rys. 4, 6, 8, 10). Rodzaj zastosowanej permanentnej usługi internetowej PPP wyróżniono kolorem. Natomiast kształt znaczników identyfikuje numer punktu pomiarowego. Na rysunku 3 przedstawiono odchyłki wypadkowej współrzędnych horyzontalnych trzech punktów osnowy pomiarowej względem pozycji referencyjnej otrzymane z opracowania obserwacji podzielonych na półgodzinne sesje. Po analizie rysunku można zauważyć zwiększony rozrzut błędów na punkcie 2, gdzie maksymalne wartości odchyłek wynoszą: 0,971 m dla GMV. Podobnie na rysunku 4 błędy składowej wysokości o największych wartościach dotyczą punktu 2, gdzie maksymalne wartości odchyłek wynoszą: 0,434 m dla GMV. W przypadku sesji jednogodzinnych (Rys. 5) nadal można zauważyć zwiększony rozrzut błędów na punkcie 2, gdzie maksymalne wartości odchyłek są już dwukrotnie mniejsze i wynoszą: 0,467 m dla GMV. Dla dwóch pozosta-

łych usług tj. APPS, CSRS wielkości błędów średnich i maksymalnych są zbliżone. Wielkości błędów maksymalnych dla sesji dwugodzinnych (Rys. 7) na punkcie 2 są zbliżone do odpowiadających im odchyłek na punktach 1 i 3. Korzystając z usług APPS lub CSRS dla sesji dwugodzinnych na punktach 2 i 3 od 89% do 100% wyznaczonych wypadkowych horyzontalnych pozycji znalazło się w przedziale  $\pm 3$  cm od pozycji referencyjnej, a od 94% do 100% obliczonych składowych wysokości zmieściło się w przedziale  $\pm 6$  cm od pozycji referencyjnej. Usługi APPS i CSRS dla sesji trzygodzinnych uzyskały od 83% do 100% wyznaczonych wypadkowych horyzontalnych pozycji w przedziale  $\pm 3$  cm od pozycji referencyjnej. Największy udział procentowy odchyłek wypadkowej horyzontalnej pozycji w przedziale  $\pm 3$  cm od pozycji referencyjnej dla sesji 6-godzinnych uzyskała usługa CSRS a dla sesji 2 i 3-godzinnych usługa APPS. Niezależnie od długości sesji pomiarowej największą dokładnością charakteryzuje się współrzędna północna (Rys. 3, 5, 7).

Tabela 4. Statystyki współrzędnych horyzontalnych *NE* pozycji na punktach osnowy pomiarowej dla różnej długości sesji

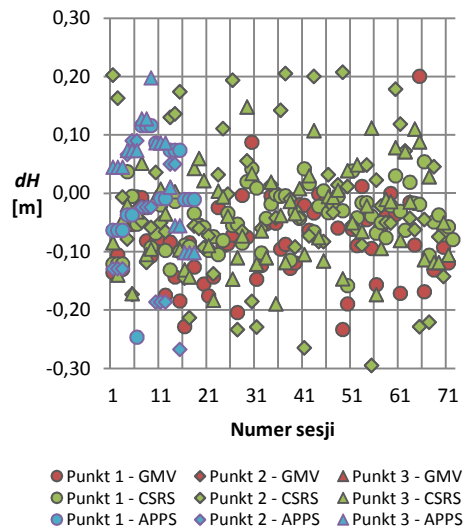
Table 4. Statistics of horizontal coordinates *NE* (North-East) of position on points of test network for different time session

Nazwa usługi	Długość sesji [h]	Średnie odchyłki  NE  [cm]			Maksymalne odchyłki  NE  [cm]			Udział procentowy w przedziale $\pm 3$ cm [%]		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
GMV	0.5	10.9	28.1	10.3	29.2	97.1	30.6	8	0	3
APPS	0.5	5.2	17.4	8.4	9.3	36.3	21.7	17	22	17
CSRS	0.5	5.7	8.5	5.2	17.4	28.5	24.9	24	24	28
GMV	1	5.6	13.4	5.9	15.5	46.7	19.4	19	9	19
APPS	1	5.1	5.5	5.5	18.4	15.3	14.4	14	14	39
CSRS	1	6.2	3.3	5.2	15.3	14.1	15.0	17	56	25
GMV	2	2.6	3.7	2.0	5.2	8.0	6.1	61	33	78
APPS	2	2.1	1.1	2.2	6.9	2.7	8.0	83	100	89
CSRS	2	3.1	1.6	1.8	7.9	4.4	8.4	44	94	89
GMV	3	2.8	1.9	1.9	5.1	4.7	5.4	58	75	83
APPS	3	1.0	0.8	1.8	2.0	1.0	5.0	100	100	83
CSRS	3	2.3	1.1	1.3	4.9	1.8	4.4	83	100	92
GMV	6	0.6	0.7	1.3	1.5	1.1	1.9	100	100	100
APPS	6	0.5	1.1	1.3	1.5	1.4	2.1	100	100	100
CSRS	6	0.2	0.7	0.2	0.3	1.3	0.4	100	100	100



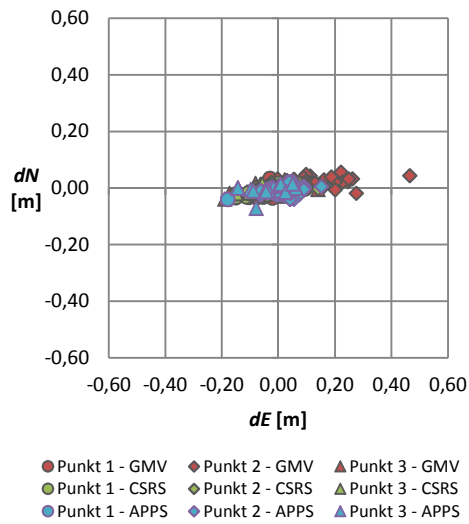
Rys. 3. Odchyłka wypadkowej współrzędnych horizontalnych  $NE$  pozycji dla sesji 0,5 godz.

Fig. 3. Deviation of the resultant  $NE$  (North-East) of horizontal coordinates of position for 0,5h sessions



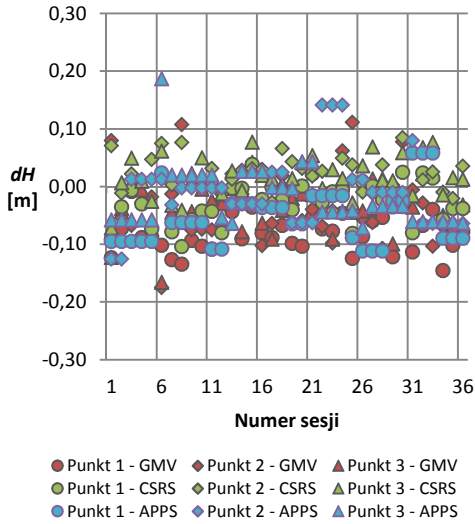
Rys. 4. Odchyłka współrzędnej wysokości  $H$  pozycji dla sesji 0,5 godz.

Fig. 4. Deviation of the height coordinate  $H$  of position for 0,5h sessions



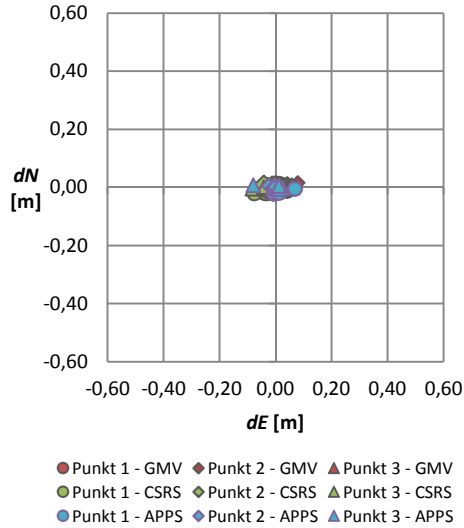
Rys. 5. Odchyłka wypadkowej współrzędnych horizontalnych  $NE$  pozycji dla sesji 1 godz.

Fig. 5. Deviation of the resultant  $NE$  (North-East) of horizontal coordinates of position for 1h sessions



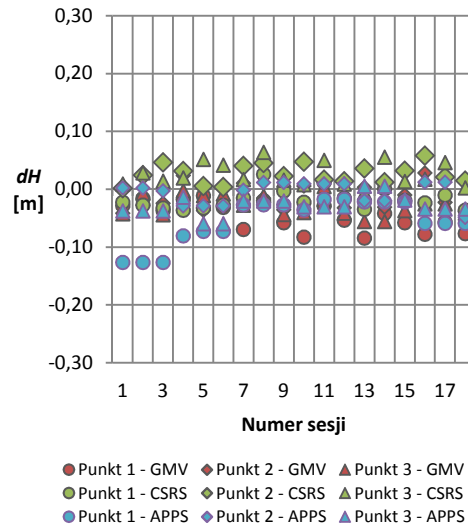
Rys. 6. Odchyłka współrzędnej wysokości  $H$  pozycji dla sesji 1 godz.

Fig. 6. Deviation of the height coordinate  $H$  of position for 1h sessions



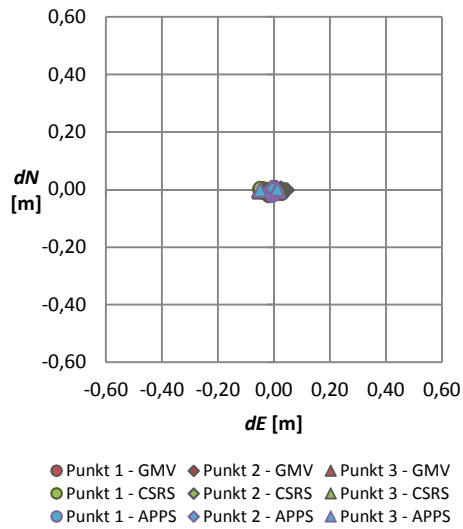
Rys. 7. Odchyłka wypadkowej współrzędnych horizontalnych *NE* pozycji dla sesji 2 godz.

Fig. 7. Deviation of the resultant *NE* (North-East) of horizontal coordinates of position for 2h sessions



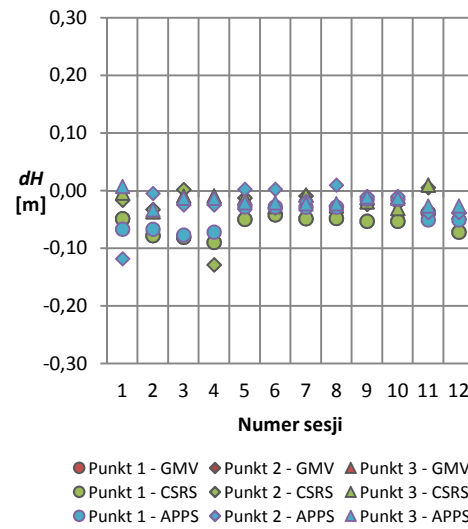
Rys. 8. Odchyłka współrzędnej wysokości *H* pozycji dla sesji 2 godz.

Fig. 8. Deviation of the height coordinate *H* of position for 2h sessions



Rys. 9. Odchyłka wypadkowej współrzędnych horizontalnych *NE* pozycji dla sesji 3 godz.

Fig. 9. Deviation of the resultant *NE* (North-East) of horizontal coordinates of position for 3h sessions



Rys. 10. Odchyłka współrzędnej wysokości *H* pozycji dla sesji 3 godz.

Fig. 10. Deviation of the height coordinate *H* of position for 3h sessions



Tabela 5. Statystyki współrzędnej pionowej  $H$  pozycji na punktach osnowy pomiarowej dla różnej długości sesjiTable 5. Statistics of the height coordinate  $H$  of positions on points of test network for different time session

Nazwa usługi	Długość sesji [h]	Średnie odchyłki $ H $ [cm]			Maksymalne odchyłki $ H $ [cm]			Udział procentowy w przedziale $\pm 6$ cm [%]		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
GMV	0.5	9.3	10.4	7.1	31.5	43.4	18.9	37	40	48
APPS	0.5	6.8	13.0	8.3	24.6	26.7	19.8	39	28	33
CSRS	0.5	5.2	5.2	3.5	15.8	29.6	13.7	65	71	82
GMV	1	8.3	6.1	4.4	14.5	17.5	16.6	25	44	78
APPS	1	6.3	4.4	4.5	11.1	14.1	18.7	44	61	75
CSRS	1	3.6	3.2	3.1	10.4	8.5	7.7	81	83	83
GMV	2	4.7	2.5	2.9	8.4	4.1	5.5	72	100	100
APPS	2	5.5	1.5	2.9	12.6	4.8	5.9	67	100	100
CSRS	2	2.2	2.7	2.6	3.6	5.9	6.4	100	100	94
GMV	3	5.8	2.9	1.9	8.9	12.8	3.7	67	92	100
APPS	3	4.3	2.5	1.9	7.6	11.8	3.3	83	92	100
CSRS	3	1.4	2.0	2.8	4.0	4.6	3.9	100	100	100
GMV	6	1.7	1.2	1.6	2.3	2.8	2.3	100	100	100
APPS	6	1.3	0.7	2.1	2.0	1.5	3.2	100	100	100
CSRS	6	2.9	2.3	3.2	3.2	2.8	3.5	100	100	100

Przedstawione w [15] wyniki badań różnych permanentnych usług PPP w zależności od długości sesji obserwacyjnej pozwalają stwierdzić, że wyznaczanie pozycji pojedynczych punktów osnowy z dokładnością 2-4 cm można uzyskać już dla 2-godzinnych sesji pomiarowych. Powyższy wniosek sformułowano w oparciu o badania na tylko 5 sesjach pomiarowych. W niniejszym artykule ilość przebadanych sesji pomiarowych zwiększono do 420 na skutek podziału 6-godzinnych obserwacji. Większa liczebności próby badawczej pozwala na podstawie rezultatów przedstawionych na (Rys. 9, 10) oraz (Tab. 4, 5) stwierdzić, że z opracowania 3-godzinnych sesji obserwacyjnych dla usługi APPS i CSRS od 83% do 100% wyznaczonych wypadkowych horyzontalnych pozycji znalazło się w przedziale  $\pm 3$  cm od pozycji referencyjnej i składowych wysokości zmieściło się w przedziale  $\pm 6$  cm od pozycji referencyjnej.

Wyniki obliczeń w postaci wartości odchyłek wartości bezwzględnej odległości zredukowanej między punktami osnowy pomiarowej 1-2, 2-3 i 3-1 dla różnych długości sesji przedstawiono odpowiednio na (Rys. 11, 13, 15). Natomiast wartości bezwzględne odchyłek wysokości względnej między punktami osnowy pomiarowej 1-2, 2-3 i 3-1 dla różnych długości sesji przedstawiono odpowiednio na (Rys. 12, 14, 16). Rodzaj zastosowanej permanentnej usługi inter-

netowej PPP wyróżniono kolorem. Porównując zamieszczone wykresy (Rys. 11, 13, 15), można zauważyć dla sesji co najmniej 1-godzinnych wyższą dokładność wyznaczania odległości zredukowanej między punktami 1-2. Różnice wielkości referencyjnych w stosunku do obliczonych między punktami 1-2 (Tab. 6) dla sesji co najmniej 1-godzinnych wynoszą: maksimum 0,189 m oraz minimum 0,013 m. Natomiast analizując wykresy zamieszczone na (Rys. 12, 14, 16), dla sesji co najmniej 1-godzinnych można zauważyć wyższą dokładność wyznaczania wysokości względnej między punktami 3-1. W takich przypadkach różnice wielkości referencyjnych w stosunku do obliczonych między punktami 3-1 (Tab. 7) wynoszą: maksimum 0,169 m oraz minimum 0,015 m.

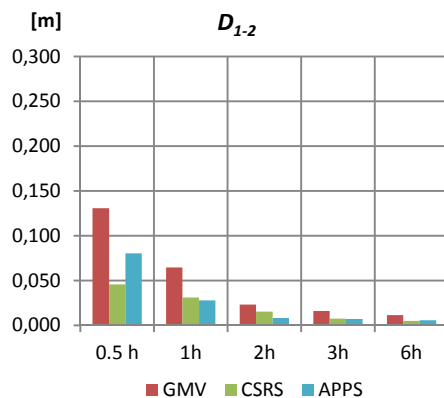
Biorąc pod uwagę sesje co najmniej 1-godzinne najmniejsze wartości odchyłek maksymalnych przy wyznaczaniu długości zredukowanej i wysokości względnej uzyskano przy użyciu usług CSRS i APPS. Przy czym wartości odchyłek maleją na korzyść usługi CSRS wraz ze skróceniem długości sesji pomiarowej (Tab. 6, 7). Największe wartości odchyłek maksymalnych przy wyznaczaniu długości zredukowanej (Tab. 6) można zaobserwować w przypadku sesji nie dłuższych niż 2-godzinne dla usługi GMV. Dla sesji co najmniej 2-godzinnych można zauważyć coraz mniejsze różnice między wartościami odchyłek maksymalnych badanych usług PPP przy wyznaczaniu długości zredukowanej oraz wysokości względnej (Tab. 6, 7). Korzystając z usług APPS lub CSRS dla sesji dwugodzinnych przy wyznaczaniu wielkości względnych między punktami osnowy pomiarowej 1-2 i 2-3 od 89% do 100% wyznaczonych długości zredukowanych pozycji znalazło się w przedziale  $\pm 6$  cm od pozycji referencyjnej, a 100% obliczonych wysokości względnych zmieściło się w przedziale  $\pm 10$  cm od pozycji referencyjnej.

Po analizie wyników prezentowanych na (Rys. 12, 14, 16) oraz (Tab. 6), można stwierdzić, że dla co najmniej 1-godzinnych sesji obserwacyjnych najmniejsze odchyłki wysokości względnej mają miejsce na odległości zredukowanej między punktami 1-2. Natomiast między parą punktów 2-3 i 3-1 odchyłki odległości zredukowanej są większe. Zależność ta może wynikać z usytuowania punktów osnowy pomiarowej względem orientacji osi układu współrzędnych. Kierunek boku trójkąta osnowy 1-2 zbliżony jest do kierunku północy, natomiast kierunki dwóch pozostałych boków 2-3 oraz 3-1 zbliżone są do kierunku wschodniego. Składowa północna najczęściej charakteryzuje się większą dokładnością (Rys. 3, 5, 7), co korzystnie wpływa na zmniejszenie odchyłek maksymalnych na odległości zredukowanej 1-2.

Na podstawie przedstawionych w [15] badań różnych permanentnych usług PPP w zależności od długości sesji obserwacyjnej stwierdzono, że już godzinne sesje pomiarowe umożliwiają wyznaczenie odległości zredukowanej lub wysokości względnej dla boków osnowy o kierunku zbliżonym do północnego z dokładnością 1-3 cm, a boków o kierunku zbliżonym do wschodniego z dokładnością 2-6 cm. Powyższy wniosek sformułowano w oparciu o badania na tylko 5 sesjach pomiarowych. W niniejszym artykule ilość przebadanych sesji pomia-

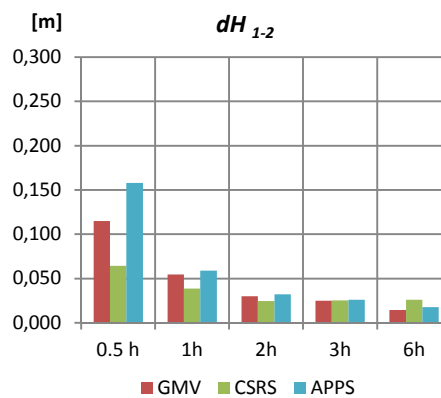
rowych zwiększono do 420. Wzrost ilości sesji uzyskano z podziału 6-godzinnych obserwacji.

Dużo większa liczebności próby badawczej pozwala na podstawie rezultatów przedstawionych na (Rys. 11, 13, 15) oraz (Tab. 6) stwierdzić, że już 3-godzinne sesje pomiarowe umożliwiają wyznaczenie odległości zredukowanej dla boków osnowy o kierunku zbliżonym do północnego z dokładnością 2-4 cm, a boków o kierunku zbliżonym do wschodniego z dokładnością 4-8 cm.



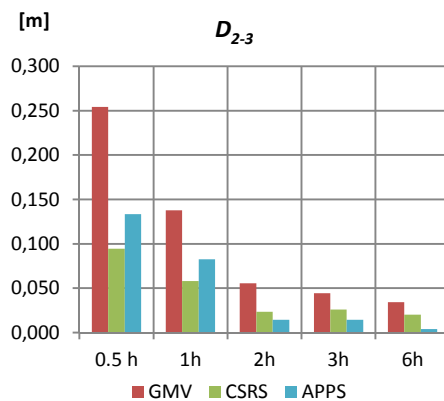
Rys. 11. Odchyłka odległości zredukowanej  $D$  między punktami 1-2 dla różnej długości sesji

Fig. 11. Deviation of the horizontal distance  $D$  between points 1-2 for different time session



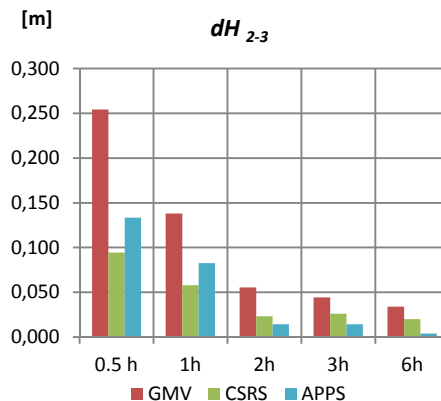
Rys. 12. Odchyłka wysokości względnej  $dH$  między punktami 1-2 dla różnej długości sesji

Fig. 12. Deviation of the relative height  $dH$  between points 1-2 for different time session



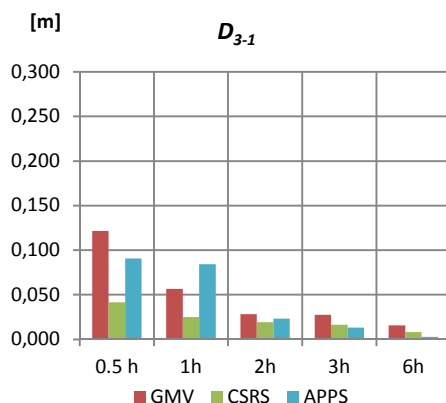
Rys. 13. Odchyłka odległości zredukowanej  $D$  między punktami 2-3 dla różnej długości sesji

Fig. 13. Deviation of the horizontal distance  $D$  between points 2-3 for different time session



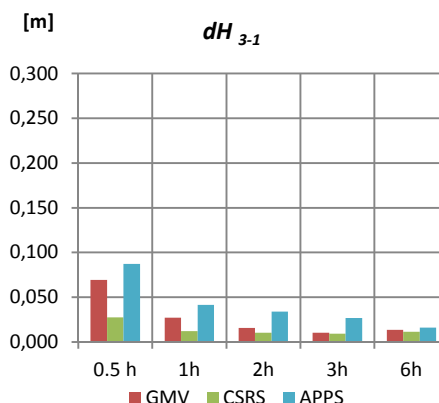
Rys. 14. Odchyłka wysokości względnej  $dH$  między punktami 2-3 dla różnej długości sesji

Fig. 14. Deviation of the relative height  $dH$  between points 2-3 for different time session



Rys. 15. Odchyłka odległości zredukowanej  $D$  między punktami 3-1 dla różnej długości sesji

Fig. 15. Deviation of the horizontal distance  $D$  between points 3-1 for different time session



Rys. 16. Odchyłka wysokości względnej  $dH$  między punktami 3-1 dla różnej długości sesji

Fig. 16. Deviation of the relative height  $dH$  between points 3-1 for different time session

Tabela 6. Statystyki odległości zredukowanej  $D$  między punktami osnowy pomiarowej dla różnej długości sesji

Table 6. Statistics for the horizontal distance  $D$  between points of test network for different time session

Nazwa usługi	Długość sesji [h]	Średnie odchyłki $ D $ [cm]			Maksymalne odchyłki $ D $ [cm]			Udział procentowy w przedziale $\pm 6$ cm [%]		
		1-2	2-3	3-1	1-2	2-3	3-1	1-2	2-3	3-1
GMV	0.5	13.1	25.4	12.1	57.4	100.2	45.1	34	7	29
APPS	0.5	8.0	13.3	9.1	29.0	45.2	16.9	33	50	33
CSRS	0.5	4.6	9.5	4.2	14.7	37.7	21.4	71	43	74
GMV	1	6.5	13.8	5.7	18.9	47.9	25.4	56	24	65
APPS	1	2.8	8.3	8.4	11.3	25.7	21.2	92	39	56
CSRS	1	3.1	5.8	2.5	7.0	16.2	9.9	97	61	89
GMV	2	2.3	5.5	2.8	5.0	10.1	8.0	100	56	89
APPS	2	0.8	1.4	2.3	1.8	7.5	7.9	100	89	72
CSRS	2	1.5	2.3	1.9	3.0	5.6	4.2	100	100	100
GMV	3	1.6	4.4	2.8	3.0	6.8	5.9	100	100	100
APPS	3	0.7	1.5	1.3	1.8	6.7	6.6	100	83	83
CSRS	3	0.8	2.6	1.6	2.1	4.8	3.9	100	100	100
GMV	6	1.1	3.4	1.6	1.6	3.9	2.0	100	100	100
APPS	6	0.6	0.4	0.3	1.3	0.7	0.4	100	100	100
CSRS	6	0.5	2.0	0.8	1.3	2.3	1.0	100	100	100

Analizując wyniki na (Rys. 12, 14, 16) oraz (Tab. 7) można zauważyć, że dla co najmniej 3-godzinnych sesji obserwacyjnych wysokość względną można wyznaczyć z dokładnością 2-6 cm. Najmniejsze wartości odchyłek maksymalnych wysokości względnej uzyskały usługi APPS i CSRS.

Tabela 7. Statystyki wysokości względnej  $dH$  między punktami osnowy pomiarowej dla różnej długości sesji

Table 7. Statistics for the relative height  $dH$  between points of test network for different time session

Nazwa usługi	Długość sesji [h]	Średnie odchyłki $ dH $ [cm]			Maksymalne odchyłki $ dH $ [cm]			Udział procentowy w przedziale $\pm 10$ cm [%]		
		1-2	2-3	3-1	1-2	2-3	3-1	1-2	2-3	3-1
GMV	0.5	11.5	25.4	6.9	42.3	35.0	33.7	59	56	79
APPS	0.5	15.8	16.9	8.7	38.9	34.0	23.9	39	39	61
CSRS	0.5	6.4	6.9	2.8	34.7	34.1	10.3	76	81	99
GMV	1	5.4	13.8	2.7	18.8	18.7	11.9	82	85	97
APPS	1	5.9	6.3	4.2	16.9	17.3	16.9	75	75	89
CSRS	1	3.9	4.1	1.2	9.6	12.7	3.5	100	94	100
GMV	2	3.0	5.5	1.6	5.9	5.6	5.8	100	100	100
APPS	2	3.2	2.5	3.4	5.9	4.9	6.8	100	100	100
CSRS	2	2.5	2.6	1.0	5.6	5.2	2.5	100	100	100
GMV	3	2.5	4.4	1.0	12.6	12.6	2.2	92	92	100
APPS	3	2.6	1.2	2.7	4.3	2.8	4.2	100	100	100
CSRS	3	2.5	1.6	0.9	5.5	4.3	2.1	100	92	100
GMV	6	1.4	0.7	1.4	2.8	1.6	1.9	100	100	100
APPS	6	1.8	0.6	1.6	2.8	1.2	2.6	100	100	100
CSRS	6	2.6	1.5	1.1	4.1	2.8	1.5	100	100	100

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione powyżej opracowanie dotyczy analizy dokładności techniki precyzyjnego pozycjonowania w zależności od długości sesji obserwacyjnej oraz rodzaju zastosowanej permanentnej usługi internetowej PPP. W wyniku badań wyznaczono współrzędne, odległości zredukowane i wysokości względnej dla trójkątnej osnowy pomiarowej. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem trzech permanentnych usług tj: APPS, CSRS-PPP, GMV magicGNSS. Natomiast przy obliczaniu odchyłek dla odległości zredukowanej  $D$  i wysokości względnej  $dH$  za wartości referencyjne przyjęto wyniki pomiarów wykonanych stacją laserową Leica TDRA 6000. Przy wyznaczaniu błędów wypadkowej horyzontalnej  $NE$  i składowej pionowej  $H$  na punktach osnowy pomiarowej jako wielkości porównawcze posłużyło opracowanie obserwacji w trybie post-

processingu z 6 najbliższych stacji referencyjnych sieci Leica SmartNet. Chcąc uzyskać większą dokładność wielkości referencyjnych niż subcentymetrowa należałoby wykonać dobowe sesje obserwacyjne, które dają dokładność milimetrową.

Na podstawie rezultatów przedstawionych na (Rys. 9, 10) oraz (Tab. 4, 5) można stwierdzić, że możliwe jest uzyskanie wypadkowej horyzontalnej pozycji o dokładności 3 cm i składowej wysokości o dokładności 6 cm z opracowania 3-godzinnych sesji obserwacyjnych.

Natomiast analiza wyników zaprezentowanych na (Rys. 11, 13, 15) oraz (Tab. 6) pozwala stwierdzić, że 3-godzinne sesje pomiarowe umożliwiają wyznaczenie odległości zredukowanej dla boków osnowy o kierunku zbliżonym do północnego z dokładnością 2-3 cm, a boków o kierunku zbliżonym do wschodniego z dokładnością 4-7 cm. Biorąc pod uwagę rezultaty na (Rys. 12, 14, 16) oraz (Tab. 7) można powiedzieć, że 3-godzinne sesje pomiarowe umożliwiają wyznaczenie wysokości względnej z dokładnością 2-7 cm. W celu uzyskania wyższych dokładności należałoby wykonać dłuższą sesję obserwacyjną.

Przedstawiony zakres badań można rozszerzyć o włączenie do sesji pomiarowych dodatkowych konstelacji satelitów jak: GLONASS, Galileo, BeiDou co mogłoby wpłynąć na skrócenie czasu trwania sesji pomiarowej w porównaniu z obserwacjami z pojedynczej konstelacji GPS przy oczekiwaniu takiego samego poziomu dokładności.

## Literatura

- [1] J. Kouba, P. Héroux, Precise point positioning using IGS orbit and clock products, *GPS Solutions*, 5, 2, 2001, 12-28.
- [2] Y. Gao, K. Chen, Performance analysis of precise point positioning using real-time orbit and clock products, *Journal of Global Positioning Systems*, 3, 1-2, 2004, 95-100.
- [3] R.F. Leandro, M.C. Santos, R.B. Langley, Analyzing GNSS data in precise point positioning software, *GPS Solutions*, 15, 1, 2009, 1-13.
- [4] Ch. Cai, Y. Gao, Precise point positioning using combined GPS and GLONASS observations, *Journal of Global Positioning Systems*, 6, 1, 2007, 13-22.
- [5] Choy S. „High accuracy precise point positioning using a single frequency GPS receiver”, *J Appl Geod* nr 5/2011, s. 59-69.
- [6] Zumberge J.F., Heflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H. „Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks”, *J. Geophys. Res.*, vol. 102(B3), 1997, s. 5005-5017.
- [7] Gao Y. „Precise point positioning and its challenges, aided GNSS and signal tracking”, *Inside GNSS*, nr 1(8)/2011, s. 16-18.
- [8] Geng J., Meng X., Dodson A.H., Teferle F.N. „Integer ambiguity resolution in precise point positioning: method comparison”, *J. Geod* nr 84(9)/2010, s. 569-581.
- [9] Rogowski J. B., Figurski M. „Ziemskie systemy i układy odniesienia oraz ich realizacje. W: Nowe obowiązujące niebieskie i ziemskie systemy i układy odniesienia oraz ich wzajemne relacje.”, Warszawa, IGiK, 2004, s. 37-68.

- [10] Stępnia K., Wielgosz P., Paziewski J. „Badania dokładności pozycjonowania techniką PPP w zależności od odległości sesji obserwacyjnej oraz wykorzystanych systemów pozycjonowania satelitarnego”, Biuletyn WAT, nr 1/2012, s. 429-450.
- [11] Guo Q., „Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation”, GPS Solutions, 2015, Vol. 19, Issue 4, p. 537-544.
- [12] Krzan G., Dawidowicz K., Świątek K., „Analysis of current position determination accuracy in natural resources canada precise point positioning service”, Artificial Satellites, 2013, 48(3), pp. 111-124.
- [13] Dawidowicz K., Krzan G., „Coordinate estimation accuracy of static precise point positioning using on-line PPP service, a case study”, Acta Geodaetica et Geophysica, 2014, Vol. 49, Issue 1, , p. 37-55.
- [14] Abdallah, A., Schwieger, V. „Static GNSS precise point positioning using free online services for Africa”, 2016, Survey Review 48(346), pp. 61-77.
- [15] Malinowski M., Kwiecień J. „A comparative study of precise point positioning (PPP) accuracy using online services”, Reports on Geodesy and Geoinformatics, Vol. 102, 2016, p. 15-31.

#### **Podziękowania**

*Chciałbym wyrazić podziękowanie firmie Effigis za nieodpłatne udostępnienie oprogramowania OnPOZ EzSurv oraz podmiotom odpowiedzialnym za zarządzanie i utrzymanie permanentnych usług internetowych PPP, które przyczyniły się do realizacji badań przedstawionych w niniejszym artykule.*

## **PRECISE POINT POSITIONING (PPP) ACCURACY USING ONLINE WEB SERVICES**

### **S u m m a r y**

Precise Point Positioning (PPP) is a technique used to determine high accuracy position with a single GNSS receiver. May be an alternative solution to differential measurements, where maintaining a connection with a single Real Time Kinematic (RTK) station or a regional Real Time Network (RTN) of reference stations is necessary. This situation is especially common in areas with poorly developed infrastructure of ground stations. This paper presents the results of a comparative analysis of accuracy of absolute determination of position from observations which last between 0,5 to 6 hours with the use of four permanent free online web services which execute calculations with PPP technique such as: Automatic Precise Positioning Service (APPS), Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSRS-PPP), GNSS Analysis and Positioning Software (GAPS) and magicPPP - Precise Point Positioning Solution (magicGNSS). For each point of test network, calculations were made using solely GPS observations and taking into account Final products. An evaluation of the impact on the accuracy of simultaneous positioning of three points test network on the change of the horizontal distance and the relative height difference between measured triangle vertices was also conducted.

**Keywords:** GPS, APPS, CSRS-PPP, GMV, magicGNSS

*Przesłano do redakcji: 14.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*





Anna SIKORA<sup>1</sup>  
Hanna HREHOROWICZ-GABER<sup>2</sup>

## PRZEKSZTAŁCENIA NOWYCH TERYTORIÓW MIEJSKICH NA PRZYKŁADZIE RZESZOWA

W XXI wieku problemy prawidłowego funkcjonowania terytoriów miejskich stają się bardzo istotnym zagadnieniem. Wydaje się, że miasta i aglomeracje, ze względu na większy potencjał gospodarczo - ekonomiczny stają się głównym elementem polityki przestrzennej państwa.

Chcąc zwiększyć dochody i prestiż, władze miast, ekonomiści i politycy dążą niekiedy do powiększenia jego administracyjnych granic. Przykładem takiego wzrostu, rozumianego w kategoriach terytorialnych i administracyjnych jest Rzeszów. W latach 2006 – 2010 miasto powiększyło swoją powierzchnię ponad dwukrotnie, a w planach strategicznych przewiduje się kolejne „przyłączenia”. Wydaje się, że te działania pomijają pewne aspekty problematyki właściwej gospodarki przestrzenią, gdzie liczą się nie tylko efekty finansowe ale zrównoważony rozwój terytorialny, w tym racjonalne gospodarowanie miejską przestrzenią mieszkaniową.

**Słowa kluczowe:** terytorium, środowisko mieszkaniowe, jakość zamieszkania, miasto

### 1. Wprowadzenie

Urbanizacja jako wiodący trend w rozwoju krajów rozwiniętych jest już trendem historycznym. Współcześnie badacze skupiają się na problemach deurbanizacji przestrzeni miejskiej w tym zjawiska “shrinking cities” - kurczenia się miast. Równocześnie powstają nieliczne miasta “na surowym korzeniu”, istniejące osady uzyskują status miast, co rodzi konieczność budowy charakterystycznych przestrzeni śródmiejskich, a także istnieją jednostki zwiększające swoje terytorium.

Obecnie w Polsce istnieją jedynie trzy miasta, które mogą wykazać wyraźny wzrost ilości mieszkańców – Warszawa, Rzeszów i Zielona Góra, przy czym

---

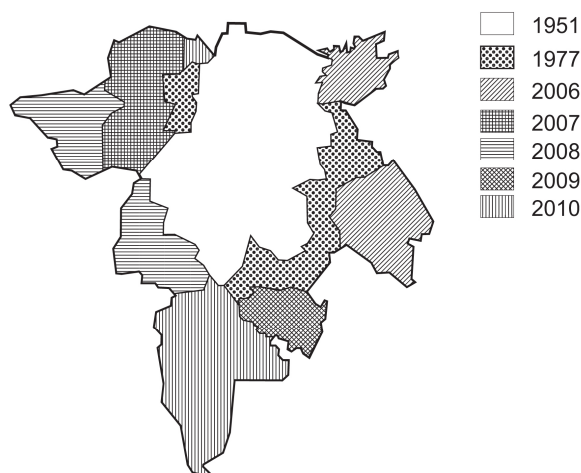
<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Anna Sikora, Politechnika Rzeszowska, Zakład Urbanistyki i Architektury, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów; tel. 178651049; sikora@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Hanna Hrehorowicz-Gaber, Politechnika Krakowska, Instytut Projektowania Miast i Regionów, Pracownia Projektowania Obszarów Śródmiejskich, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 126282268; hanna.hrehorowicz-gaber@pk.edu.pl

przypadek Rzeszowa i Zielonej Góry wynika nie z imigracji mieszkańców ale z zabiegów polegających na rozszerzaniu granic jednostki terytorialnej.

## 2. Rozwój terytorialny jednostki – casus Rzeszowa

W latach 2006-2010 powierzchnia stolicy podkarpacia powiększyła się o 117% a miasto, które było najmniejszym pod względem terytorialnym ośrodkiem wojewódzkim w ciągu czterech lat przesunęło się na o wiele wyższą pozycję. Te pozorne działania urbanizacyjne zwiększyły co prawda ilość mieszkańców przez co można mówić o procesie formalnej urbanizacji, nie zmieniając jednak preferencji mieszkańców co do charakteru inwestycji mieszkaniowych - wiodącym trendem jest tuciążenie w kierunku „strefy podmiejskiej”<sup>3</sup> i budowa domu jednorodzinnego z ogródkiem.



Rys. 1. Proces wzrostu terytorialnego Rzeszowa w latach 1951 - 2010, (opracowanie własne autorki)

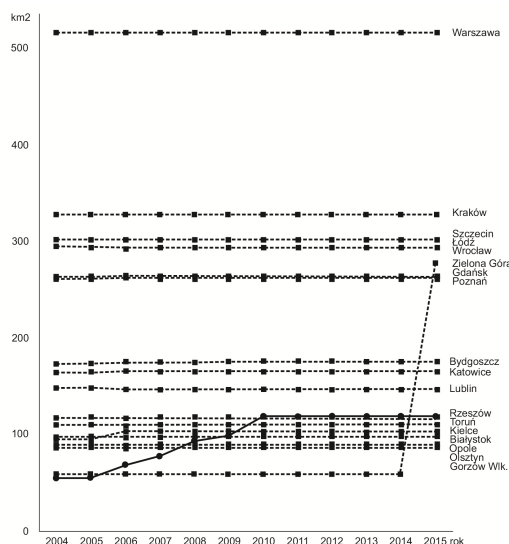
Fig. 1. Rzeszów's territorial expansion process in 1951-2010 (own work of the author)

Na rysunku 1. przedstawiono kolejne “przyłączenia” sąsiadujących sołectw lub ich fragmentów od 1951 roku, kiedy to miasto miało powierzchnię 39 km<sup>2</sup> i około 35 tys. mieszkańców. W 1971 dokonano symbolicznej korekty granic Rzeszowa a w 1977 roku w związku z dużą migracją ze wsi do miasta dokonano znaczącego poszerzenia. Mimo że, populacja zwiększyła się o około 200%

<sup>3</sup> W przypadku dynamicznego wzrostu terytorialnego trudno określić jednoznacznie termin „strefa podmiejska”. W literaturze przedmiotu określa się tą nazwą zarówno obszary zlokalizowane poza granicami administracyjnymi miast jak i poza zwartą tkanką o charakterze miejskim – spełniającej warunek tzw. „miejskości miasta”

w stosunku do roku 1951 przyłączone tereny stanowiły w przybliżeniu 30% dotychczasowej powierzchni miasta<sup>4</sup>.

W 2006 roku nastąpiła ogólnopolska korekta granic stolic województw<sup>5</sup> (rys. 2). Przyłączenie sąsiednich wsi Załęże i Słocina, które przeprowadzono w tymże roku wydaje się być uzasadnione. Gęstość zaludnienia była wtedy jedną z najwyższych w kraju<sup>6</sup> i wynosiła 2396 mieszkańców na km<sup>2</sup>, więc stworzenie nowych terytoriów inwestycyjnych, zarówno mieszkaniowych jak i przemysłowych dawało szansę na zdynamizowanie rozwoju miasta, szczególnie, że jego wielkość i struktura pozwalała na szybki dojazd do centrum. Powiększanie miasta miało również pozytywny aspekt polityczny - przedstawione w ujęciu promocyjno - rozwojowym wzbudzało powszechną akceptację dla władzy. Prawdopo-



Rys. 2. Proces wzrostu terytorialnego wiodących ośrodków wojewódzkich w latach 2004-2015, na osi x lata od 2004 do 2015, na osi y powierzchnia ośrodków w km<sup>2</sup> (opracowanie własne autorki)

Fig. 2. Territorial expansion process of leading regional centers in 2004-2015, years 2004 to 2015 on the x axis, the area of the centers in km<sup>2</sup> on the y axis (own work of the author)

<sup>4</sup> Dane przedstawiono na podstawie Encyklopedii Rzeszowa z 2004 roku

<sup>5</sup> W wyniku działań administracyjno-terytorialnych w 2006 roku siedem (7) ośrodków wojewódzkich zmniejszyło swoją powierzchnię (Wrocław, Toruń, Lublin, Gorzów Wielkopolski, Łódź, Kraków oraz Szczecin), pozostałe zwiększyły swoją powierzchnię, przy czym trzy miasta znacząco (Rzeszów, Białystok i Gdańsk), (badania własne autorki na podstawie danych GUS)

<sup>6</sup> Najwyższą gęstość zaludnienia liczoną w ilości mieszkańców na km<sup>2</sup> miały odpowiednio: Warszawa - 3282, Białystok - 2887, Łódź - 2678, Lublin - 2407 oraz Rzeszów - 2396, (badania własne autorki na podstawie danych GUS)

dobnie jest to jeden z głównych powodów dla których Rzeszów utrzymał ten kierunek przy czym mimo podwojenia powierzchni przy około 12% wzroście populacji władze ciągle starają się o kolejne absorpcje. Za tym, że miasto posiadało zbliżoną do optymalnej powierzchnię w roku 2006 przemawia fakt, że główna aktywność deweloperska skupia się ciągle (stan na 2016 r.) w strefie przyłączenia z 1977 roku.

### **3. Ramowa analiza aktywności deweloperskiej w nowym terytorium – osiedlu Słocina**

Osiedle Słocina<sup>7</sup> zostało zasymilowane najwcześniej przez co mogłoby się wydawać, że jego włączenie było niezbędne ze względów planowania rozwoju miasta. Analizując strukturę zabudowy osiedla można stwierdzić, że lokalna tkanka ma charakter ekstensywny, główna aktywność deweloperska skupia się na budowie charakterystycznych dla tego regionu suburbanizacyjnych zespołów zabudowy powstałych na skutek wytyczenia w łanie pola drogi i podziale na małe (bez lub z minimalnym ogródkiem) szeregowo działki domów jednorodzinnych (głównie wolnostojących, niekiedy ciągów zabudowy szeregowej). Taki sposób zabudowy wynika z polityki przestrzennej miasta, która polega na minimalizacji ilości sporządzanych miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego, które zastępowane są przez tańszą i według władz miasta wygodniejszą formę decyzji ws ustalenia warunków zabudowy<sup>8</sup>.

W tkance wyróżnia się kilka budynków wielorodzinnych zlokalizowanych w otoczeniu zabudowy zagrodowej (w tym z produkcją rolniczą) oraz zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej przy ślepo zakończonych uliczkach. Budynki wielorodzinne znacząco różnią się od otoczenia wysokością oraz formą a także charakterem układu zespołu urbanistycznego części obiektów. Zabudowa rozwija się chaotycznie, co jest szczególnie niepokojące, gdyż są to tereny niezwykle atrakcyjne widokowo i przyrodniczo zlokalizowane na granicy Karpat. Rozlewająca się w układzie linijkowym zabudowa nieodwracalnie niszczy krajobraz strefy będącej do tej pory strefa przejściową (continuum) między miastem a okolicznymi wsiami. Jest to szczególnie istotne w kontekście powiązań funkcjonalno - widokowych wewnętrznych, ponieważ centrum Rzeszowa zlokalizowane jest w niecce otoczonej ze wszystkich stron wzgórzami.

---

<sup>7</sup> Na rys. 1 zlokalizowane skrajnie od strony wschodniej, w połowie “wysokości” struktury miasta, wysokość określono na osi pn.-pd.

<sup>8</sup> Ten sposób myślenia jest charakterystyczny nie tylko dla władz Rzeszowa i Podkarpacia, z tym, że na podstawie raportów o stanie pokrycia wydanymi i sporządzanymi formami planowania przestrzennego (suikzp, mpzp, wz i ulicp) można stwierdzić absolutny prymat województwa podkarpackiego

#### 4. Interakcje przestrzenne – jakość środowiska mieszkaniowego

Według współczesnych badań na komfort zamieszkania wpływają bardzo zróżnicowane czynniki, takie jak m.in. intymność i spokój, kontakt z naturą (przyrodą), poczucie bezpieczeństwa, harmonia przestrzeni, dostępność do usług podstawowych i ponadpodstawowych, w tym usług i dóbr kultury, a także estetyka miejsca<sup>9</sup>. W zależności od preferencji mieszkańca wymienione elementy mogą występować w zmiennych proporcjach<sup>10</sup>. Zachowanie tradycyjnego continuum obszarów o charakterze m.in. mieszkaniowym daje szansę na stworzenie przestrzeni życia odpowiadającej na zróżnicowane zapotrzebowania. Środowisko miejskie, podmiejskie czy wiejskie z założenia oferują łatwy do przewidzenia model życia.

Niestety w czasach globalizacji i dynamicznego wzrostu technologicznego, w tym w zakresie komunikacji, dostępu do informacji i kultury, tworzenia społeczności a przez to łatwości i intensywności aktywności continuum miejsko-wiejskie ulega zatarciu a niedogodności użytkowania stają się oczywiste dopiero w trakcie użytkowania.

Szczególnym przypadkiem takiego zjawiska jest szybki nieracjonalny wzrost terytorium miasta. Należy zauważyć, że zgodnie z ustaleniami ustawy o ochronie gruntów rolnych i leśnych<sup>11</sup> na terenach położonych w granicach administracyjnych miast nie wymaga się uzyskiwania zgody na zmianę przeznaczenia gruntów rolnych i leśnych na cele nierolnicze i nieleśne dzięki czemu możliwe jest praktycznie nieograniczone wydawanie decyzji ws. ustalenia decyzji o warunkach zabudowy.

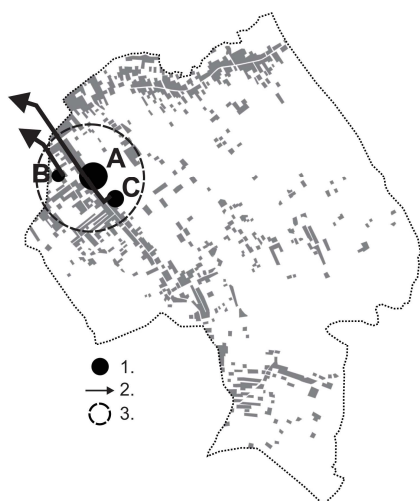
Wieś Słocina przyłączano do Rzeszowa etapami, ostatni fragment o powierzchni 9,16 km<sup>2</sup> w 2006 r. W tym czasie obszar ten zamieszkiwało 4769 osób co dawało gęstość zaludnienia 521 mieszkańców/km<sup>2</sup>. Wskaźnik ten kształtował się wzrostowo i w 2010 wynosił 5225 osób i 570 miesz./km<sup>2</sup> a w 2014: 5968 osób czyli 651 miesz./km<sup>2</sup>. Ilość mieszkańców wzrosła więc stosunkowo niewiele o 1199 osób w ciągu 8 lat. Mimo niewielkich zmian ludnościowych (również we wskaźnikach gęstości zaludnienia o charakterystyce wiejskiej) na fragmentach

<sup>9</sup> Zestawienie czynników wpływających na jakość środowiska mieszkaniowego podano za J. Kobylarczyk Jakość środowiska mieszkaniowego w strefie centralnej wybranych miast województwa podkarpackiego, Kraków 2007, s. 29-35. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu przedstawiono uproszczoną interpretację. Szerokie rozważania na temat problematyki jakości w urbanistyce i architekturze przedstawione są m. in. w opracowaniu pod redakcją E. Niezabitowskiej i D. Masły Oceny jakości środowiska zbudowanego i ich znaczenie dla rozwoju koncepcji budynku zrównoważonego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007

<sup>10</sup> Dość często odnosi się jakość środowiska zamieszkania bezpośrednio jedynie do wyartykułowanych przez mieszkańców lub potencjalnych mieszkańców na podstawie ankiet (wywiadów) preferencji. Z punktu widzenia autorki nie jest to do końca optymalna metoda gdyż polegając na odczuciach osób w pewnym sensie przypadkowych (nie mających specjalistycznej wiedzy) i może być opierana na interpretacji typowych błędów heurystycznych: reprezentatywności czy dostępności.

<sup>11</sup> Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów rolnych i leśnych (Dz.U.2015 poz. 909, 1338, 1695)

osiedla nastąpiło szybkie przemieszanie się zabudowy o różnym charakterze i różnym sposobie użytkowania dzięki czemu można pokusić się o analizę interakcji pomiędzy sąsiadującymi funkcjami i formami (rys. 3.).



Rys. 3. Przybliżona gęstość i charakter struktury zabudowy osiedla Słocina (stan na 2015 r.) przyłączonego do Rzeszowa w 2006 r., oznaczenia: 1 - lokalizacja zabudowy wielorodzinnej, 2 - kierunek ciążenia obsługi komunikacyjnej, 3 - orientacyjny obszar najbliższego sąsiedztwa i wzmożonej interakcji, A,B,C - oznaczenia pojedynczych obiektów i zespołów zabudowy (opracowanie własne auterek)

Fig. 3. Approximate density and character of the structure development of the Słocina housing estate (2015 status) incorporated to Rzeszów in 2006, markings: 1 - location of multi-family houses, 2 - direction of road access, 3 - approximate area of the closest neighborhood and increased interaction, A, B, C - markings of single objects and complex building developments (own work of the author)

Na badanym terenie (rys. 3) możemy wyróżnić osiem (8) podstawowych rodzajów zabudowy mieszkaniowej: zagrodowa - produkcyjna, jednorodzinna wolnostojąca, jednorodzinna wolnostojąca w osiedlach, szeregową liniową, szeregową z przestrzenią półprywatną, domy wielorodzinne o charakterze formalnym zabudowy szeregowej, średniowysokie bloki wielorodzinne z dachami wielospadowymi oraz zespół niskiej zabudowy wielorodzinnej (małe osiedle) o formie nowoczesnej z płaskimi dachami. Już ta mnogość rodzajów pokazuje dynamikę zmian urbanistycznych i architektonicznych w wiejskiej tkance o charakterze produkcyjnym. Większość zmian lokalizuje się w obszarze określonym na rys. 3 jako "obszar wzmożonej interakcji", na pozostałym obszarze zmiany struktury są dużo mniej widoczne.

Niezwykle interesujące jest również rozłożenie aktywności inwestycyjnej w czasie, najpierw pojawiały się pojedyncze inwestycje luźno zlokalizowanej zabudowy wolnostojącej jednorodzinnej na dużych działkach - byli to typowi "greenseekers" wierzący, że przeprowadzka za miasto zapewni im oczekiwany komfort życia. W drugiej kolejności pojawiły się małe osiedla o układzie liniowym zarówno domów wolnostojących, bliźniaczych jak i szeregowych a następnie dopiero inwestycje w obiekty wielorodzinne zarówno wolnostojące jak i w zespołach. Biorąc pod uwagę bardzo precyzyjnie określone oczekiwania mieszkańców każda z grup może czuć się oszukana, gdyż ich intencje co do profitów wynikających ze zmiany miejsca zamieszkania były całkowicie odmienne.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Przemiany struktur terytoriów nowomiejских można analizować pod wieloma względami. Oprócz zamieszczonej we wcześniejszym rozdziale analizy struktury funkcjonalno-formalnej (widokowej) można brać pod uwagę kryteria np. społeczne: aspiracji zastanych, nowych i potencjalnych mieszkańców czy szeregu zagrożeń i konfliktów wewnętrznych i zewnętrznych.

Badając różne aspekty funkcjonowania i kształtowania się nowej tkanki uwagę zwraca wielość wymiarów społeczno-urbanistyczno-architektonicznych, które często funkcjonują w sposób niezadowolający.

Budowa lub przebudowa terytoriów miejskich daje szanse i możliwości autorskiego kształtowania przestrzeni zgodnie z zasadami współczesnej urbanistyki. Niestety bardzo często główną dominantą zmian jest wspieranie tych korzystnych dla ekonomicznego wizerunku miasta i doraźnych profitów. Ważnym jest, że rozwój ekonomiczny i przestrzenny w ujęciu jakościowym nie muszą się wykluczać, co więcej ich synergia jest pożądanym zjawiskiem, mającym wpływ nie tylko na środowisko i jakość życia mieszkańców ale również na sposób postrzegania miasta w aspekcie kapitałów rozwojowych.

## Literatura

- [1] Budzyński Z., Draus J., Kawalek J. i inni, Encyklopedia Rzeszowa, Rzeszów 2004.
- [2] Kobylarczyk J. Jakość środowiska mieszkaniowego w strefie centralnej wybranych miast województwa podkarpackiego, praca doktorska opracowana na Wydziale Architektury Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.
- [3] Niezabitowska E., Masły D. (red.) Oceny jakości środowiska zbudowanego i ich znaczenie dla rozwoju koncepcji budynku zrównoważonego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [4] Stangel M. Kształtowanie współczesnych obszarów miejskich w kontekście zrównoważonego rozwoju, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [5] Schneider-Skalska G. Kształtowanie zdrowego środowiska mieszkaniowego. Wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.

## **THE TRANSFORMATION OF NEW URBAN (cities) TERRITORIES ON THE EXAMPLE OF RZESZOW**

### **S u m m a r y**

In the 21st century, the problem of a proper functioning of urban areas has become a very important issue. It seems that cities and agglomerations, because of their increased economic potential, have become the main part of the country's land-use policy.

To increase the income and prestige of a city, city authorities, economists and politicians sometimes strive to expand the administrative borders of this city. Rzeszow is an example of such an expansion, in terms of its territory and administration. In 2006-2010 the city expanded more than twice, and further expansions are envisaged in strategy plans. It seems that these actions neglect some aspects of the proper land-use policy, where not only do financial effects count but also a sustainable territorial development, including rational management of urban housing space.

**Keywords:** territory, housing environment, housing conditions, city

*Przesłano do redakcji: 24.04.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Wojciech ECKERT<sup>1</sup>

## MODERNISTYCZNY BUDYNEK SZPITALA W NOWEJ SOLI. NIEZNANE DZIEŁO ERNSTA KOPPA. PRZYKŁAD RACJONALIZACJI FUNKCJI, TECHNOLOGII, KONSTRUKCJI

Nowa Sól jest stosunkowo młodym miastem. Mimo początków sięgających połowy XV w. prawa miejskie uzyskało dopiero w 1743 r. Jest tu niewiele zabytków wysokiej klasy. Jednym z nich jest modernistyczny budynek dawnego szpitala. Znaczenie tej budowli jest wyjątkowe, nie tylko ze względu na architekturę, ale także ze względu na jej twórcę, którym był niemiecki architekt Ernst Kopp (1890-1962). Obiekt zbudowany w Nowej Soli był jego pierwszym projektem, w którym zaproponował innowacyjne podejście do tego typu budownictwa. Takie kompaktowe i ekonomiczne szpitale wzniesiono, z drobnymi zmianami, także w innych niemieckich miastach, Gütersloh w 1932 r. i w Holzminden w 1933 r. Kolejna realizacja Koppa to wielopiętrowy szpital im. M. Lutra w Berlinie wzniesiony w 1931 r., który w momencie otwarcia został uznany za najbardziej nowoczesny obiekt w stolicy Niemiec. Kopp opracował koncepcję funkcjonalnego, ekonomicznego szpitala krótkich dystansów, która opierała się na zasadzie kwadratowego rzutu poziomego, eliminującego duże odległości, które w placówce musi pokonywać personel. Odnaleziony w Archiwum Państwowym w Zielonej Górze projekt szpitala w Nowej Soli pozwala na szczegółową analizę rozwiązań funkcjonalnych. W 2002 r. budynek został sprzedany prywatnemu przedsiębiorcy, który nie zakończył remontu. Obecnie niezabezpieczony budynek ulega powolnej dewastacji. Jest to jedyna realizacja Ernsta Koppa na terenie Polski. Razem z otaczającym parkiem, dawny szpital stanowi istotny element kompozycyjny i architektoniczny modernistycznej części dzielnicy Zatorze w Nowej Soli.

**Słowa kluczowe:** architektura, modernizm, forma, funkcja, konstrukcja, szpital, zabytek

### Wprowadzenie

Nowa Sól jest miastem, którego początki sięgają połowy XV w. Jego założeniem była warzelnia soli i skupione przy niej osiedle robotników. Dopiero w 1743 r. osada uzyskała prawa miejskie. Jest tu mało zabytkowych budowli

---

<sup>1</sup> Wojciech Eckert, Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, ul. Licealna 9, 65-417 Zielona Góra; tel. 68 328 24 16; w.eckert@ib.uz.zgora.pl

o znaczących wartościach kulturowych. Jednym z nich jest nieznaną szerzej, modernistyczny budynek dawnego szpitala.

Szpital jest zlokalizowany w południowo-zachodniej części miasta, w obrębie dzielnicy Zatorze. Znajduje się na dużej, zadrzewionej działce, zajmującej centralną część kwartału ograniczonego ulicami H. Sienkiewicza, Przyszłości, M. Skłodowskiej-Curie, K. Kaczkowskiego, Wojska Polskiego. Wzdłuż ulicy usytuowana jest zabudowa jednorodzinna pochodząca z lat 20. i 30. XX w. Główny wjazd na teren szpitala znajduje się od północnego zachodu, od strony ulicy H. Sienkiewicza.

## Historia

Zatorze to dzielnica Nowej Soli, która powstała na początku XX w. na zachód od linii kolejowej. Jej plan zagospodarowania przestrzennego stworzył znany niemiecki architekt Peter Behrens. Ulica H. Sienkiewicza, niem. *Raudener Strasse*, miała stanowić główną oś dla dużego osiedla mieszkaniowego. Ostatecznie zmodyfikowany projekt realizowano od początku lat 20. XX w. W pierwszej kolejności przy ulicy H. Sienkiewicza wzniesiono budynki wielorodzinne, a od początku lat 30. XX w. rozpoczęto budowę domów jednorodzinnych. [2]

Teren na zapleczu ulicy przeznaczono na budowę szpitala powiatowego. W 1927 r. powołano komitet budowy szpitala, a rok później powstał projekt budynku autorstwa architekta Ernsta Koppa. Kamień węgielny pod budowę szpitala położono 18 grudnia 1928 r. Inwestycję zrealizowano bardzo szybko, w pierwszym roku światowego kryzysu gospodarczego. Projekt ten otrzymał priorytet wśród wszystkich inwestycji prowadzonych na terenie ówczesnego powiatu kożuchowskiego oraz wsparcie rządowe. Uroczyste otwarcie miało miejsce 26 kwietnia 1930 r.

Twórca projektu - Ernst Kopp (1890-1962) zapisał się w historii architektury jako budowniczy nowoczesnych szpitali. Budynek w Nowej Soli był jego pierwszym projektem, w którym zrealizował innowacyjne podejście do budownictwa szpitalnego. Ten kompaktowy i ekonomiczny typ szpitala zrealizowano z drobnymi zmianami także w innych niemieckich miastach - w Gütersloh w 1932 r. oraz w Holzminden w 1933 r. Kolejne realizacje Koppa to wielopiętrowy szpital im. M. Lutra w Berlinie (1931 r.), który w momencie otwarcia uznano za najbardziej nowoczesny obiekt w stolicy Niemiec. Został on odtworzony w prawie niezmienionej formie w Aleksandrii w Egipcie. Za sprawą tych budynków Kopp zyskał międzynarodową sławę, a szpitale jego autorstwa odnaleźć można m.in. w Brazylii, Iranie, Pakistanie. [3]

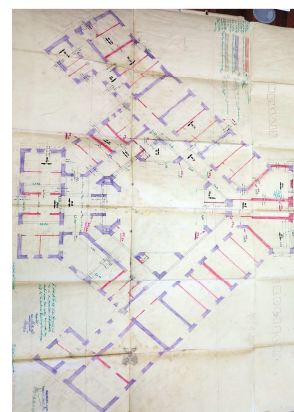
Ernst Kopp postrzegał szpital jako złożony organizm, którego poszczególne organy powinny doskonale współgrać ze sobą (rys. 1-2). Opracował koncepcję funkcjonalnego, ekonomicznego szpitala krótkich dystansów. Opierała się ona na zasadzie kwadratowego rzutu poziomego, eliminującego duże odległości,

które w placówce musi pokonywać personel. Oddziały zajmujące poszczególne piętra miały być samodzielne i połączone z centralnie położonymi pomieszczeniami zabiegowymi za pomocą windy. Istotną innowacją wprowadzoną przez Koppa było umiejscowienie kuchni na ostatniej kondygnacji. Dzięki temu zlikwidowano problemy z wentylacją i zapachami towarzyszącymi gotowaniu. Kuchnia centralna była połączona windą z kuchniami pomocniczymi, rozmieszczonymi na każdym piętrze. Do tzw. herbaciarni docierało jedzenie w większych pojemnikach z głównej kuchni i tu dopiero było porcjowane. [3]



Rys. 1. Nowa Sól, szpital powiatowy, widok od północy. Poczтівka z l. 30. XX w. [4]

Fig. 1. The district hospital building in Nowa Sól. The view from the North. Postcard dating from the 30's of the 20th century [4]



Rys. 2. Nowa Sól, szpital powiatowy, rzut parteru, projekt z 10.1928 r. [1]

Fig. 2. The district hospital building in Nowa Sól. Ground floor plan. The project of November 1928 [1]

Szpital w Nowej Soli był sześciokondygnacyjną budowlą centralną, założoną na rzucie sześciokąta z wewnętrznym dziedzińcem. Elewacje o skromnym detalu architektonicznym były opracowane w cegle klinkierowej, jedynie szeroki pas tynku oddzielał poziom parteru od piętra. Szpital przeznaczony był na 135 łózek. Okna sal chorych oraz świetlica wychodziły na słoneczną stronę południową, w kierunku parku. Po północnej stronie rozmieszczono głównie gabinety zabiegowe, pokoje administracyjne, magazyny. Na podstawie archiwalnych projektów i informacji zawartej w niemieckiej publikacji na temat Ernsta Koppa można opisać poszczególne kondygnacje. W piwnicy znajdowała się kotłownia i zaopatrzenie w ciepłą wodę oraz magazyny. Na parterze ulokowano biuro przyjęć, punkt pierwszej pomocy, oddział rentgenowski, izbę dziecięcą oraz oddział zakaźny, który posiadał osobne wejście i nie był połączony z pozostałą częścią budynku. Na pierwszym piętrze mieściły się gabinety lekarzy i ordynatora, laboratorium i sale na 28 łózek. Na drugim piętrze funkcjonował oddział prywatny. Oddział chirurgiczny dla mężczyzn i strefę operacyjną zorganizowano na trzecim piętrze, a piętro czwarte było przeznaczone na oddział dla kobiet,

w tym porodowy. Ostatnia kondygnacja była niepełna. W części północnej budynku urządzono kuchnię, a po południowej stronie mogły mieścić się otwarte tarasy. W pobliżu budynku głównego znajdowały się mniejsze obiekty przeznaczone dla karet pogotowia, pralni i pomieszczeń dezynfekcyjnych. Wokół szpitala rozciągał się kilkuhektarowy park z ciągami spacerowymi, z sosnowym i brzozowym zagajnikiem oraz ogrodem warzywnym. Około 1940 r. w parku wybudowano cztery schrony przeciwlotnicze.

Po II wojnie światowej szpital został przejęty przez Armię Czerwoną i do 1991 r. funkcjonował jako Szpital Wojskowy Północnej Grupy Wojsk Radzieckich. Teren szpitala wraz z pobliskimi domami stanowił zamknięty obszar przeznaczony na potrzeby jednostki wojskowej. Po likwidacji garnizonu radzieckiego w Nowej Soli obiekt został przekazany władzom miejskim. Przez pewien czas budynek był dzierżawiony przez Towarzystwo Agentów Celnych i Spedytorów w Zielonej Górze, ale ostatecznie niezabezpieczony uległ dewastacji pod koniec lat 90. XX w. W 2002 r. dawny szpital został sprzedany prywatnemu przedsiębiorcy, który go wyremontował i uporządkował park. Nie znaleziono jednak nowej funkcji dla budynku. Obecnie pozostaje nieużytkowany i niezabezpieczony, demolowany popada w ruinę (rys. 3-4).



Rys. 3. Nowa Sól, dawny szpital powiatowy. Widok od północy na elewację frontową, stan obecny

Fig. 3. The building of the former district hospital in Nowa Sól. View from the North to the front elevation. Current state



Rys. 4. Nowa Sól, dawny szpital powiatowy. Figura kobiety z dzieckiem na fasadzie

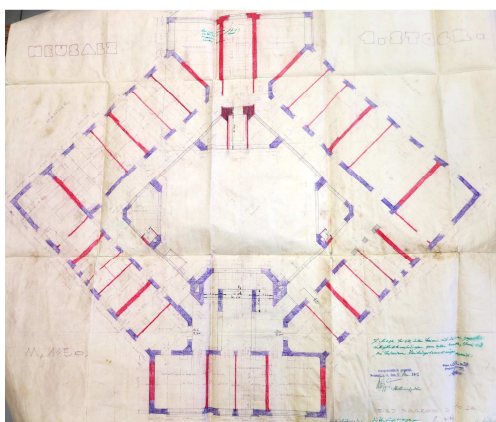
Fig. 4. The building of the former district hospital in Nowa Sól. Figure of a woman with a child, located on the facade

### Stan obecny budynku

Jest to budowla centralna, założona na planie sześcioboku, z wewnętrznym dziedzińcem w kształcie ośmioboku, obecnie zadaszonym. Sześciokondygnacyjny, podpiwniczony korpus główny jest ujęty po bokach parterowymi skrzy-

dłami. Ściany wzniesiono z cegły pełnej palonej na zaprawie cementowo-wapiennej, a pomieszczenia przekryto stropami ceramicznymi typu Ackermana. Wieloboczna bryła nakryta jest niskim dachem pulpitowym, odeskowanym, o pokryciu z papy. Elewacje były pierwotnie opracowane w cegle klinkierowej, obecnie są otynkowane. Posiadały skromny detal architektoniczny w formie gzymsów, opasek okiennych, portalu na elewacji tylnej. Oś centralna fasady oraz elewacji tylnej zostały podkreślone pseudoryzalitami, artykułowanymi poziomymi pasami ceglanyymi i otynkowaną płaszczyzną pomiędzy nimi. Podobnie zostały opracowane elewacje skrzydeł bocznych. Obecnie te partie są również w całości otynkowane. Fasada została zamknięta attyką oraz ozdobiona pełnoplastyczną figurą kobiety z niemowlęciem w ramionach, która znajduje się na osi na poziomie piątej kondygnacji (rys. 5).

Układ wnętrza budynku odzwierciedlał nowatorskie idee architekta E. Koppa. Wejście główne z szerokimi drzwiami znajduje się na osi budynku. Poprzez wiatrołap prowadzi do przestronnego holu, na osi którego znajduje się szyb windy oraz żelbetowa, trójbiegowa klatka schodowa. Tylne wejście prowadzi do południowej części budynku, w której mieści się dwubiegowa żelbetowa klatka schodowa oraz szyb windy towarowej. Układ jest dwutraktowy – wewnętrzny to korytarz biegnący wokół patio, a zewnętrzny miał funkcję użytkową (rys. 6).



Rys. 5. Nowa Sól, szpital powiatowy, rzut parteru, projekt z 10.1928 r. [1]

Fig. 5. The district hospital building in Nowa Sól. First floor plan. The project of November 1928 [1]



Rys. 6. Nowa Sól, dawny szpital powiatowy. Portal wejściowy w elewacji tylnej

Fig. 6. The building of the former district hospital in Nowa Sól. The entrance at the rear facade of the building

Rozpoczęty po 2002 r. remont generalny obiektu nie został ukończony. Największą wprowadzoną zmianą było zadaszenie dziedzińca, dzielące go na dodatkowe kondygnacje. Konstrukcję stanowią stalowe słupy i rygle, na których



oparto gęstożebrowy strop żelbetowy. Ostatnią kondygnację przykryto stropodachem, składającym się z żelbetowego stropu i niskiego dachu pulpitowego, krytego papą. Istotną współczesną ingerencją był remont elewacji. Ściany zewnętrzne otynkowano, a poziom cokołu wyłożono okładziną ceramiczną. Z oryginalnego detalu zachowały się gzymsy kordonowe oraz portal na tylnej elewacji wykonane z cegły klinkierowej. Pozostawiono także rzeźbę kobiety z dzieckiem na fasadzie. Kształt okien - przede wszystkim na elewacji tylnej i częściowo na bocznych, został zmieniony. Część otworów zamurowano, wybito też nowe okna. Na fasadzie zlikwidowano wykusze na trzecim piętrze. We wszystkich otworach okiennych wymieniono stolarkę, która nie utrzymuje oryginalnych podziałów.

Nie zachował się oryginalny wystrój ani wyposażenie. Tynki wewnętrzne zostały skute. Pozostały ślady pierwotnej malatury sufitów w kolorze pomarańczowym na ostatniej kondygnacji. Niektóre ściany działowe wyburzono, postawiono kilka nowych. Część otworów okiennych i drzwiowych zamurowano. Zlikwidowano windy. Ściany najwyższej kondygnacji częściowo ocieplono od wewnątrz styropianem i bloczkami gazobetonowymi. Podłogi usunięto, na fragmentach zachowało się lastriko. Prace remontowe we wnętrzu zmieniły w niewielkim stopniu układ funkcjonalny budynku (rys. 7).

Pomimo współczesnych prac remontowych i modernizacyjnych budynek utrzymał oryginalną formę. Z wyjątkiem zadaszenia nad patio bryła zachowała się bez przekształceń. Obecnie budynek pozostaje niezabezpieczony, stając się obiektem wandalizmu (rys. 8).



Rys. 7. Nowa Sól, dawny szpital powiatowy, hol przy wejściu głównym, stan obecny

Fig. 7. The building of the former district hospital in Nowa Sól. The lobby at the main entrance of the building



Rys. 8. Nowa Sól, dawny szpital powiatowy, klatka schodowa po stronie północnej

Fig. 8. The building of the former district hospital in Nowa Sól. The staircase of the building on the northern side

W parku otaczającym szpital występują liczne okazy starych drzew, głównie okazałych sosen i dębów. Przed wejściem głównym widoczny jest kształt dawnego gazonu. Ciągi komunikacyjne nie są czytelne. Układ kompozycyjny wymaga prac rewaloryzacyjnych (rys. 9).

Budynek został wzniesiony w stylu modernistycznym, cechując się wyrazistą i kubiczną bryłą, zdyscyplinowanym użyciem detalu architektonicznego, klarowną kompozycją i układem wewnątrz podporządkowanym idei optymalizacji i ekonomizacji (rys. 10).



Rys. 9. Nowa Sól, dawny szpital powiatowy, pomnikowe drzewa na terenie parku

Fig. 9. The building of the former district hospital in Nowa Sól. The monumental trees in the park



Rys. 10. Nowa Sól, dawny szpital powiatowy, schron na terenie parku

Fig. 10. The building of the former district hospital in Nowa Sól. The bomb shelter located in the park

## Wnioski

Budynek będący przedmiotem analizy to wyjątkowy przykład nowoczesnej architektury, reprezentujący styl modernistyczny. Jest to pierwszy wieżowiec szpitalny na terenie ówczesnych Niemiec i pierwszy projekt znanego architekta szpitali - Ernsta Koppa, w którym zrealizował nowatorskie rozwiązania. Jest to jedyna realizacja tego architekta na terenie Polski. Razem z otaczającym parkiem dawny szpital stanowi istotny element kompozycyjny i architektoniczny modernistycznej części dzielnicy Zatorze.

Niestety ten wyjątkowy obiekt, posiadający znaczące wartości zabytkowe, ulega powolnej, stopniowej degradacji, zarówno pod wpływem warunków atmosferycznych jak i dewastacji ze strony osób trzecich.

Istnieje pilna potrzeba wpisania modernistycznego budynku szpitala w Nowej Soli, wraz z jego otoczeniem, do rejestru zabytków. Umożliwi to przeprowadzenie przyszłego remontu pod nadzorem służb konserwatorskich tak aby można było wyeksponować piękno i oryginalność budowli zawarte nie tylko w jego architekturze i konstrukcji ale także wyjątkowych rozwiązaniach funkcjonalnych.

## Literatura

- [1] Akta Miasta Nowa Sól , sygn. 1028-1033, w: Archiwum Państwowe w Zielonej Górze.
- [2] T. Andrzejewski, M. Gączarzewicz, J. Parahus, *Nowosolskie ulice, Tom 4, P-T*, Nowa Sól 2011.
- [3] P. R. Pawlik: *Von Saarow nach Alexandria. Ernst Kopp (1890–1962)*.
- [4] <http://dolny-slask.org.pl> {dostęp 24. 02. 2015 r.}.

## THE MODERNIST BUILDING OF THE HOSPITAL IN NOWA SÓL. UNKNOWN WORK OF ERNST KOPP. EXAMPLE OF EFFICIENCY OF FUNCTION, TECHNOLOGY AND CONSTRUCTION

### Summary

Nowa Sól is a relatively young city. Although its origins dating back to the mid -15th century, it was granted town privileges as late as in 1743. There are few high class interesting sights here. One of them is the modernist building of the former hospital. The importance of this building is unique not only because of its architecture but also due to its creator, who was the German architect Ernst Kopp (1890-1962). The building, which was built in Nowa Sól was his first project, in which he proposed an innovative approach to such type of construction. Such compact and economical hospitals were built, with slight variations, also in other German cities - Gütersloh in 1932. and Holzminden in 1933. Another Kopp's realization is a multi-storey M. Luther Hospital in Berlin built in 1931, which at the time of opening was considered the most modern property in the capital of Germany. Kopp developed the concept of a functional, economical hospital of short distances, which was based on the principle of the square horizontal projection, eliminating long distances, that hospital staff had to walk. Found at the State Archives in Zielona Góra, the Nowa Sól hospital project allows for detailed analysis of functional solutions. In 2002 the building was sold to a private entrepreneur who did not complete the renovation. Currently unprotected, building of the former hospital is slowly being devastated. It is the only realization of Ernst Kopp in Poland. Along with the surrounding park, the old hospital is an important architectural and composition element of the modernist district of Zatorze in Nowa Sól.

**Keywords:** architecture, modernism, form, function, design, hospital, monument

*Przesłano do redakcji: 05.05.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Radosław PISKORSKI<sup>1</sup>

## MODELOWANIE 3D BUDYNKÓW NA POTRZEBY WALORYZACJI MIEJSKIEGO KRAJOBRAZU Z WYKORZYSTANIEM ANALIZ WIDOCZNOŚCI NA PRZYKŁADZIE KRAKOWA

Ochrona walorów krajobrazowych w miastach, szczególnie w aspekcie uwzględnienia obiektów zabytkowych, jest istotnym problemem urbanistów i planistów przy kreowaniu sylwety miejskiej. W tego typu zagadnieniach często wykorzystuje się analizy widoczności, które pozwalają na symulację widoku z wybranego miejsca w oparciu o cyfrowe modele terenu (NMT) i jego pokrycia (NMPT). W związku z tym w pracy podjęto badania nad problemem modelowania 3d budynków w aspekcie optymalizacji tworzenia numerycznego modelu pokrycia terenu z wykorzystaniem danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego. Zaproponowano trzy warianty uwzględniania budynków w tego typu analizach: pierwszy bazujący na modelu nieregularnej siatki trójkątów (TIN) oraz dwa warianty wykorzystujące obiekty *multipatch* o różnym stopniu szczegółowości (LoD1 i quasi-LoD2). W procesie ich generowania wykorzystano informację pochodzącą ze sklasyfikowanej chmury punktów oraz obrysów budynków pochodzących z bazy BDOT10k. Pozostałe komponenty pokrycia terenu (głównie roślinność) oraz powierzchnię terenu uwzględniono w analizach w postaci modelu TIN. Jako obszar badawczy wybrano wzgórze Wawelskie, jedno z najbardziej charakterystycznych miejsc krakowskiego krajobrazu. Z wykorzystaniem algorytmu opartego na liniach widoczności (*LoS*) sprawdzono wpływ sposobu modelowania budynków na uzyskane wyniki analiz widoczności. W wyniku stwierdzono wyższość rozwiązań opartych na obiektach *multipatch*, głównie z powodu prostoty ich implementacji względem modelu TIN, bez utraty dokładności modeli budynków. Stwierdzono również, że szczegółowość takich obiektów nie wpływa w znaczący sposób na uzyskane wyniki, głównie ze względu na analizowanie dużego obszaru w trakcie analiz dotyczących oceny miejskiego krajobrazu.

**Słowa kluczowe:** lotniczy skaningu laserowy, tin, obiekty *multipatch*, linia widoczności

### 1. Wprowadzenie

Krajobraz w znaczny sposób wpływa na odczucia dotyczące atrakcyjności miejsca, w którym się znajdujemy. Istotne znaczenie ma on zwłaszcza dla obszarów chętnie odwiedzanych przez turystów. Ochrona sylwety miasta z uwzględnie-

---

<sup>1</sup> Radosław Piskorski; AGH w Krakowie; Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska; bud. C4; Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 664650657; radoslawpiskorski@gmail.com

niem jej charakterystycznych obiektów jest kluczowym zagadnieniem, z którym muszą mierzyć się ich włodarze w dobie postępującej i nieco niekontrolowanej urbanizacji. Problem waloryzacji krajobrazu jest zagadnieniem badanym od prawie pół wieku. Początkowo proponowano metody bazujące na wiedzy eksperckiej ([1],[2],[3]), które jednak pomimo udziału kilku oceniających, cechowały się dużym subiektywizmem. W celu uzyskania bardziej obiektywnych wyników wprowadzono pewne parametry, za pomocą których można by oceniać krajobraz. Jednak zastosowanie wskaźników (głównie przyrodniczych i turystycznych) powoduje problemy z ich jednoznaczną parametryzacją [4]. Naprzeciw takim wyzwaniom przychodzą metody oparte na analizach widoczności. Pozwalają one określić jaka część przestrzeni jest widoczna z danego punktu. Najpopularniejszymi stosowanymi algorytmami są *viewshed* i *isovist* [5]. Wykorzystują one linie widoczności (ang. *line of sight*, *LoS*), które są niczym innym jak odcinkami łączącymi obserwatora z punktami analizowanego obszaru. Początkowo wykonywano analizy w oparciu o przestrzeń dwuwymiarową, bez uwzględniania zróżnicowania rozmiaru i wysokości przeszkód oraz topografii terenu. Wraz z rozwojem metodyki pojawiły się rozwiązania modelujące widoczność w aspekcie trójwymiarowym. Takie podejście umożliwiło modyfikację linii widoczności definiowanej jako krzywa zawierająca informację o fragmencie przestrzeni widocznej, niewidocznej, ale także tę jej część, którą zajmowała przeszkoda [6]. Uwzględnienie trójwymiarowości przestrzeni pozwoliło na określenie części obiektów (budynków), które są widoczne, a które nie [7]. W związku z tym w wyniku analiz widoczności zamiast rozpatrywać tylko dwie sytuacje (obiekt w całości widoczny/niewidoczny, logika binarna) wprowadzono wariant rozmyty (ang. *fuzzy*) lepiej oddający ludzki sposób postrzegania rzeczywistości. Określa on widoczność jako prawdopodobieństwo zobaczenia obiektu [8].

## 2. Modelowanie powierzchni terenu i jego pokrycia

Modelowanie powierzchni terenu i jego pokrycia jest nieodłącznym problemem związanym z analizami widoczności. Początkowo badania prowadzono na prostych makietach terenowych na które padało światło żarówki imitując promienie słoneczne [9]. W wyniku otrzymywano wykresy widoczności. Wraz z biegiem czasu zaczęto implementować bardziej zaawansowane rozwiązania pozwalające m.in. na określenie wspólnego pola widzenia dla kilku obserwatorów jednocześnie (tzw. skumulowane wykresy widoczności) [10]. Pojawienie się cyfrowych modeli terenu wpłynęło w znacznym stopniu na rozwój badań. Wyróżniamy dwa główne, najpopularniejsze modele:

- regularna siatka punktów GRID,
- nieregularna siatka trójkątów TIN (ang. *Triangulated Irregular Network*).

Pierwszy model jest bardzo często wykorzystywany w analizach przestrzennych ze względu na prostotę, a przez to łatwość w implementacji. Drugi z powodu na swoją skomplikowaną konstrukcję składającą się z siatki trójkątów, pomimo

większej dokładności, jest rzadziej stosowany w systemach GIS. Porównując strukturę obu modeli należy również zwrócić uwagę na jej specyfikę. W aspekcie budowy modeli należy zwrócić uwagę na fakt, iż GRID zwykle przedstawia powierzchnie jako powierzchnię 2d, gdzie wysokości zróżnicowane są za pomocą atrybutów poszczególnych komórek. Natomiast TIN, najczęściej bazuje na powierzchni 2,5d, która przedstawia teren z uwzględnieniem jego topografii. Nie jest on jednak pozbawiony pewnych błędów, związanych ze zbytnią generalizacją elementów pokrycia terenu (głównie roślinność i zabudowę).

Szczególnie istotne z punktu badania miejskiego krajobrazu jest optymalizowanie procesu modelowania budynków. Według standardów CityGML [11] wyróżnia się kilka poziomów szczegółów (ang. *level of detail, LoD*), począwszy od płaskich obrysów budynków (LoD0) poprzez modele 3d z płaskimi dachami (LoD1), zachowującymi podstawową geometrię płaszczyzn dachów (LoD2) i elementy elewacji (LoD3) aż po modele wiernie przedstawiające wnętrza (okna, drzwi, meble itp.) budynków (LoD4) z możliwością uwzględnienia rzeczywistych cech (barwa) ich elementów (rys. 1). Najczęściej takie modele w analizach GIS występują w postaci tzw. *multipatch feature*. Są to obiekty składające się ze zbioru płaszczyzn (ang. *patches*) tworzących i ograniczających obiekt 3d [12]. W zależności od celu i oczekiwanej dokładności modelowanie budynków odbywa się z wykorzystaniem różnych danych. Najczęściej jednak korzysta się z chmur punktów pochodzących z lotniczego skaningu laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning, ALS*), wspomagając się zdjęciami lotniczymi/satelitarnymi [13] czy danymi katastralnymi [14].



Rys. 1. Poziomy szczegółów zdefiniowane przez CityGML (na podstawie [15])

Fig. 1. Level of detail defined by CityGML (based on [15])

### 3. Metodyka i wyniki badań

#### 3.1. Charakterystyka danych wykorzystanych w badaniach

Jako dane wejściowe wykorzystano pozyskane w ramach projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju) dane ALS, na które składa się zbiór chmur punktów dla dużych polskich miast [16]. System skanujący umieszczony na pokładzie samolotu wraz z systemami GPS oraz INS (ang. *Inercial Naviga-*

tion System, inercyjny system nawigacyjny) pozwala na pozyskanie quasi-ciągłej informacji powierzchni terenu i jego pokrycia [17]. Chmura punktów jest zbiorem zarejestrowanych punktów, które poza współrzędnymi przestrzennymi (X,Y,Z) posiadają inne atrybuty tj. intensywność (związana z właściwościami refleksyjnymi obiektów), kolor czy odbicie (*echo*). Dodatkowo każdy punkt jest przyporządkowany (sklasyfikowany) do kategorii odpowiadającej pokryciu terenu, które reprezentuje, według następujących kroków [18]:

- grunt w oparciu o iteracyjny proces wpasowania płaszczyzn (wykorzystuje się kryterium kątowe i odległościowe),
- roślinność podzieloną na trzy grupy w zależności od wysokości względnej:
  - niska (0 – 0.40m ponad powierzchnią terenu),
  - średnia (0.40 – 2.00m),
  - wysoka (2.00m < ),
- zabudowa w oparciu o przybliżone wymiary (długość krawędzi) minimalne bądź maksymalne.

Poza danymi ALS w badaniach wykorzystano obrysy budynków pochodzące z bazy BDOT10k (warstwa OT\_BUBD\_A). Zawiera ona informację na temat następujących obiektów [19]:

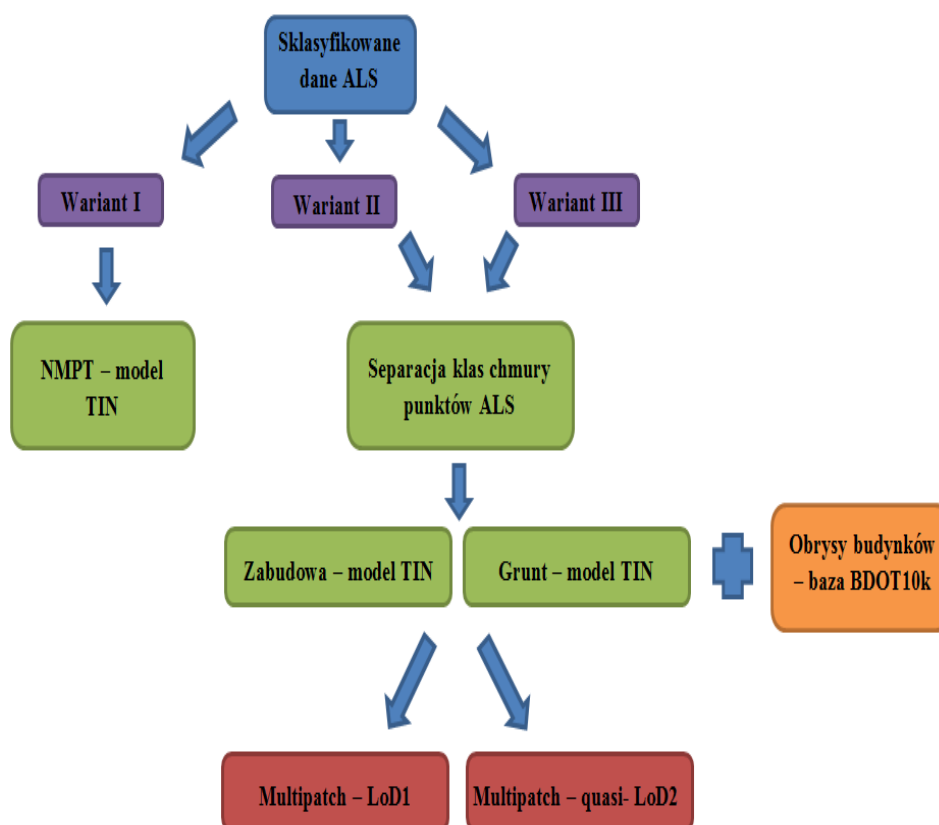
- sieć wodna,
- sieć komunikacyjna,
- sieć uzbrojenia terenu,
- pokrycie terenu,
- budynki, budowle i urządzenia,
- kompleksy użytkowania terenu,
- tereny chronione,
- jednostki podziału terytorialnego,
- obiekty inne.

Budynki w warstwie OT\_BUBD\_A wprowadza się w oparciu o zarys podstawowy w oparciu o dane pochodzące z bazy danych ewidencji gruntów i budynków. Jednak występują od tego wyjątki, zwłaszcza na obszarach, gdzie ewidencja nie jest zbyt aktualna – wtedy budynki są wprowadzane w oparciu o plany obiektów bądź na podstawie wysokorozdzielczej ortofotomapy/zdjęć lotniczych. Warto również zwrócić uwagę, na fakt iż istnieje kryterium powierzchniowe, gdy budynku nie wprowadza się do bazy ( $< 40 \text{ m}^2$ ). Niezwykle ważne z punktu widzenia modelowania 3d jest także fakt dopuszczenia możliwości agregacji budynków o tej samej funkcji, stykających się ścianami, niespełniających kryterium powierzchniowego jako osobne obiekty.

### 3.2. Założenia zaproponowanej metodyki

Głównym celem badań jest znalezienie optymalnego rozwiązania dotyczącego problemu modelowania 3d budynków w aspekcie analiz widoczności. W tym celu zaproponowano trzy warianty uwzględniania budynków w tego typu analizach (rys. 2.):

- numeryczny model pokrycia terenu w postaci TIN,
- zabudowa w postaci obiektów *multipatch* (LoD1),
- zabudowa w postaci obiektów *multipatch* (quasi-LoD2).



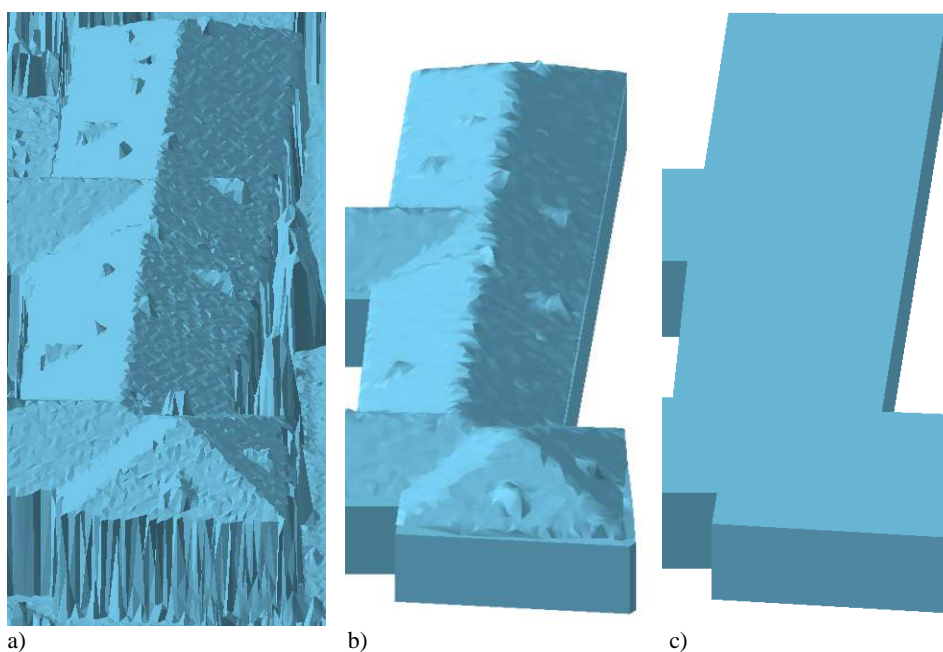
Rys. 2. Schemat zaproponowanej metodyki

Fig. 2. Scheme of proposed methodology

Pierwszy zakłada stworzenie NMPT w postaci modelu TIN w oparciu o chmurę punktów bez podziału przestrzeni na odrębne komponenty. Pozostałe dwa warianty zakładają wyodrębnienie ze sklassyfikowanych danych ALS zbioru punktów reprezentujących zabudowę i powierzchnię terenu. Na ich podstawie stworzono modele TIN w analogiczny sposób jak w pierwszym wariantcie. W oparciu o takie dane z wykorzystaniem obrysów budynków z bazy BDOT10k wygenerowano modele budynków w postaci obiektów *multipatch*. W przypadku modeli o szczegółowości LoD1 wykorzystano wartości wysokości powierzchni terenu ( $H_{\min}$ ) i zabudowy ( $H_{\max}$ ) w obrębie każdego poligonu reprezentujących budynki. Na podstawie tych atrybutów wygenerowano modele 3d. Dla poziomu

quasi-LoD2 procedura ta jest bardziej skomplikowana. Podobnie jak w przypadku wariantu drugiego każdemu obiektowi przypisano dwie wartości wysokości – dla powierzchni terenu ( $H_{\min}$ ) i zabudowy ( $H_{\min}'$ ), z tym że w przypadku tej drugiej warstwy nadano minimalną wartość wysokości dachu budynku. W ten sposób uzyskano modele budynków od przyziemia aż do zakończenia elewacji (w przypadku budynków o dachach spadowych) bądź całe konstrukcje (w przypadku dachów płaskich). Dachy modelowane są z pomocą wygenerowanego w postaci TIN modelu zabudowy – poprzez jego wycięcie w oparciu o poligony reprezentujące budynki. W tym wypadku model 3d budynku składa się więc z dwóch części. Porównanie przykładowych modeli ze wszystkich zaproponowanych wariantów prezentuje rys. 3.

Jako obszar testowy wybrano wzgórze Wawelskie. Wybór jest spowodowany faktem, iż jest to jedno z najbardziej charakterystycznych miejsc Krakowa, które jest jedną z dominant jeżeli chodzi o krajobraz stolicy małopolski. Zlokalizowane na nim obiekty (wchodzące w skład Starego Miasta) zostały wpisane na listę światowego dziedzictwa UNESCO jako jedne z pierwszych (w 1978 r.) i cieszą się ogromną popularnością wśród turystów.

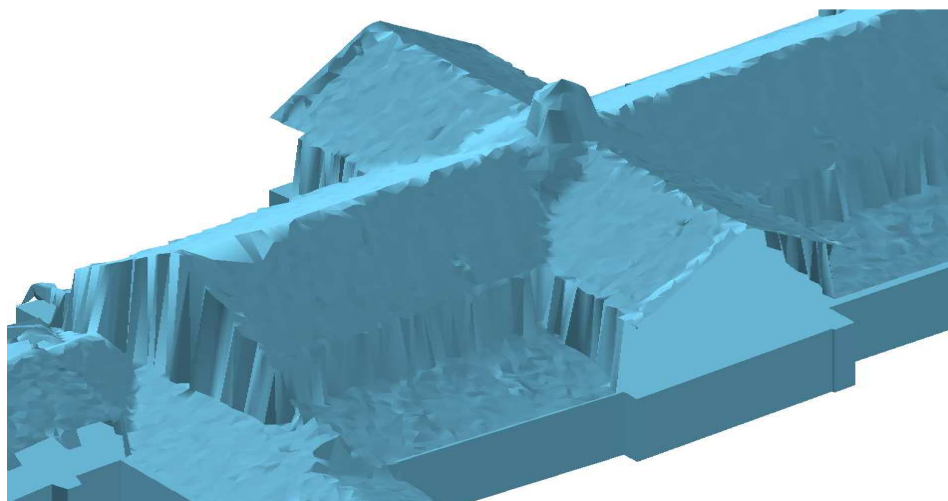


Rys. 3. Różnice w wariantach modelu 3d tego samego budynku: a – model TIN, b – model LoD1, c – model quasi-LoD2

Fig. 3. Differences in 3d model variants of the same building: a – model TIN, b – model LoD1, c – model quasi-LoD2

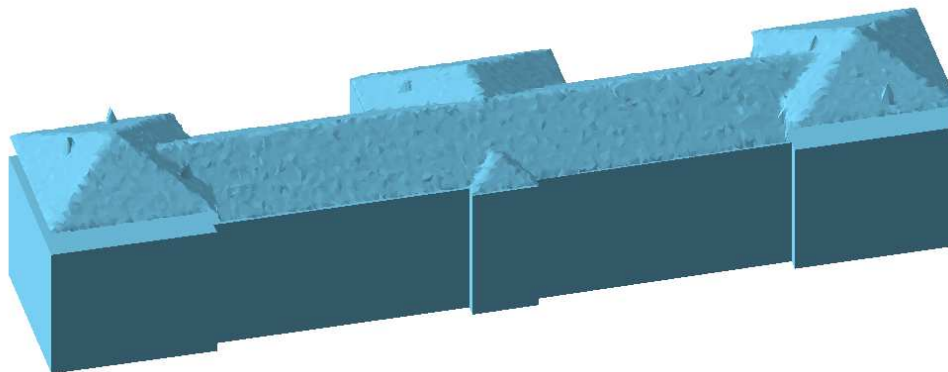
#### 4. Analiza wyników

Analizując wyniki warto zwrócić uwagę na błędy związane z generowaniem modeli budynków w postaci obiektów *multipatch* w oparciu o dane ALS oraz obrysy budynków pochodzące z bazy BDOT10k. Jedną z głównych przyczyn występujących rozbieżności jest różna aktualność danych – chmury punktów pozyskano w lipcu 2012 roku, natomiast warstwa budynków w bazie BDOT10k jest aktualizowana przy okazji tworzenia map topograficznych (ostatnia aktualizacja w latach 2015-2016). Kolejną przyczyną różnic jest różna dokładnością sytuacyjną – w przypadku lotniczego skaningu laserowego 0,40 m (założenia projektu ISOK [20]) natomiast założenia budowy bazy ewidencji gruntów i budynków zakładają błąd sytuacyjny na poziomie 0,10 m (dokładność pomiaru szczegółów sytuacyjnych I grupy [21]). Również sposób klasyfikacji punktów reprezentujących budynki może wpłynąć na pojawienie się błędów. Ze względu na lotniczy pułap rejestracji są one przedstawiane głównie za pomocą dachów (czasami także fragmentów ścian w zależności od kąta skanowania), które zwykle mają większe pole powierzchni niż przyziemie, co w sztuczny sposób powiększa budynki. Czwartą przyczyną rozbieżności jest fakt dopuszczania w bazie BDOT10k agregacji obiektów o zbyt małej powierzchni, co bez uwzględnienia zróżnicowania ich wysokości może prowadzić do powstania artefaktów (podobnie w przypadku zróżnicowanej struktury jednego budynku). Przykłady błędów przedstawiono na rys. 4-5. Wspomniane rozbieżności w modelach wystąpiły w pojedynczych przypadkach i wymagały manualnej poprawy.



Rys. 4. Błąd spowodowany różną dokładnością danych

Fig. 4. Error caused by different data accuracy



Rys. 5. Błąd wynikający ze zróżnicowania konstrukcji w obrębie jednego budynku

Fig. 5. Error resulting from differentiation of structure within a single building

W oparciu o trzy warianty modeli budynków (w przypadku wariantów II i III teren oraz pozostałe elementy pokrycia terenu zostały przedstawione w postaci modelu TIN) wykonano analizę widoczności z wykorzystaniem linii widoczności, które łączyły obserwatora znajdującego się na kopcu Kościuszki (jedne z najwyższych punktów widokowych Krakowa) z punktami znajdującymi się na elementach budynków (ściany, dach). W wyniku każdy odcinek otrzymał atrybut mówiący o tym czy jego punkt końcowy jest widoczny czy niewidoczny z punktu obserwacyjnego; w analizie pominięto pozostałą część miasta pomiędzy kopcem Kościuszki a wzgórzem Wawelskim w celu usprawnienia przebiegu analizy). Na tej podstawie porównano uzyskane wyniki, które zestawiono w tab. 1. Wskazują one na praktycznie znikomą różnicę w uzyskanych wynikach. Jednak biorąc pod uwagę czas trwania analiz to widoczna jest ogromna przewaga wariantów wykorzystujących obiekty *multipatch* na rzecz tradycyjnego modelu TIN (prawie 5-krotnie krótszy czas trwania procesu). Poza tym ten ostatni znacznie zniekształca krawędzie budynków, a przez to zaburza poprawną prezentację zabudowy dla użytkownika. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że wyniki uzyskane w oparciu o dokładniejszy model quasi-LoD2 są nieco gorsze niż te uzyskane w oparciu o model LoD1, chociaż tak jak wspomniano różnica ta w przypadku oceny krajobrazu jest zaniedbywalna. Porównując otrzymane wyniki sprawdzono, czy uzyskane różnice mają charakter przypadkowy czy istnieje jakaś prawidłowość. Ich analiza wykazała, że wszystkie rozbieżności wystąpiły w obrębie dachów budynków. Jednak zważywszy na fakt analizowania obszaru o dużej powierzchni z miejsca oddalonego od obiektów o kilka kilometrów można założyć, że nie wpłyną one na ocenę atrakcyjności krajobrazu przez obserwatora (w tego typu analizach szczegóły nie odgrywają aż tak dużej roli).



Tabela 1. Porównanie uzyskanych wyników analizy widoczności

Table 1. Comparison of visibility analysis results

Wariant	Linie widoczne	Linie niewidoczne	Czas przetwarzania [min]
I	121 456	186 123	242
II	120 043	187 536	31
III	119 967	187 612	37

## 5. Wnioski

Generowanie modeli 3d budynków jest zagadnieniem dość złożonym. W zależności od wymaganych dokładności i celu przeprowadzanych analiz stosuje się różne rozwiązania. W przypadku waloryzacji krajobrazu opartej na analizach widoczności przeprowadzone badania wykazały znikomą wyższość którejkolwiek z zaproponowanych wariantów nad pozostałymi. Jednak czas trwania procesu wskazuje, że rozwiązanie bazujące na obiektach *multipatch* jest o wiele bardziej korzystne niż w przypadku modelu TIN, bez straty dla dokładności modeli. Sama szczegółowość modeli również nie ma znacznego wpływu na wyniki końcowe analiz widoczności. Warto również zwrócić uwagę, że generowanie modeli w oparciu o fuzję dwóch typów danych powoduje występowanie artefaktów. Fakt ten może być spowodowany różną dokładnością, rozbieżnością czasową pozyskania danych czy zróżnicowaniem pod względem pozyskania informacji o geometrii (dachy i przyziemia).

Według autora takie podejście do problemu modelowania budynków pokazało, że pomimo występowania pewnych rozbieżności, spośród zaproponowanych rozwiązań można wybrać to optymalne, bazujące na obiektach *multipatch*. Pomimo pewnych uproszczeń w ich tworzeniu (w przypadku modelu quasi-LoD2 zastosowano obiekty składające się z dwóch części) takie rozwiązanie pozwala na sprawne przeprowadzenie analiz, które w przypadku oceny krajobrazu nie wymagają wysokiej dokładności. Jest to spowodowane tym, że obserwator w przypadku waloryzacji krajobrazu nie skupia się na szczegółach, tylko na ogólnych odczuciach, które są kształtowane głównie przez dominanty, czyli charakterystyczne obiektu miasta.

*Prace omówione w tym artykule zostały zrealizowane w ramach grantu dziekańskiego 11.15.150.466/17*

## Literatura

- [1] Wejchert K.: Elementy kompozycji urbanistycznej, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1974.
- [2] Wright G.: Appraisal of visual landscape qualities in region selected for acceleration growth, *Landscape Planning*, 1, 1974, pp. 307-327.
- [3] Lynch K.: *The image of the City*, MIT Press, Cambridge Massachusetts 1960.

- [4] Kostowski M., Śleszyński P.: Presja turystyczna na tle walorów krajobrazowych Polski, *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego PTG*, 14, 2010, s. 36-51.
- [5] Tandy C.R.V.: The isovist method of landscape survey, *Symposium Methods of Landscape Analysis*, Londyn 1967.
- [6] Yang P.P.-J., Putra S.Y., Li W.: Viewsphere: a GIS-based 3D visibility analysis for urban design evaluation, *Environment and Planning B: Planning and Design* 34, 2007, pp. 971-992.
- [7] Morello E., Ratti C.: A digital image of the city: 3D isovists in Lynch's urban analysis, *Environment and Planning B: Planning and Design* 36, 2009, pp. 837-853.
- [8] Bartie P., Reitsma F., Kingham S., Mills S.: Advancing visibility modeling algorithms for urban environments, *Computers, Environment and Urban System* 34, 2010, pp. 518-531.
- [9] Felleman J.P.: *Landscape visibility – theory and practice*, School of Landscape Architecture, C.E.S&F., S.U.N.Y, Syracuse 1979.
- [10] Ozimek P., Böhm A., Ozimek A., Wańkiewicz W.: *Planowanie przestrzeni o wysokich walorach krajobrazowych przy użyciu cyfrowych analiz terenu wraz z oceną ekonomiczną*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2013, s. 15-25.
- [11] Open Geospatial Consortium, *OGC City Geography Markup Language (GityGML), Encoding Standard*, 2012.
- [12] <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/multipatches.html> (dostęp: 01.06.2017).
- [13] Habib A., Kwak E., Al-Durgham M.: Model-Based Automatic 3D Building model generation by integrating lidar and aerial images, *Archives of Photogrammetry, Cartography and remote sensing*, vol 22, 2011, pp. 187-200.
- [14] Overby, J., Bodum, L., Kjems, E., Ilsoe, P. M.: Automatic 3D building reconstruction from airborne laser scanning and cadastral data using Hough transform. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXV, part B3, 2004.
- [15] [www.directionsmag.com](http://www.directionsmag.com) (dostęp: 03.06.2017 r.).
- [16] <http://www.isok.gov.pl> (dostęp: 02.06.2017 r.).
- [17] Kurczyński Z.: *Fotogrametria*, PWN, Warszawa 2014, s. 241-245.
- [18] Wężyk P. (red): *Podręcznik dla uczestników szkolenia z wykorzystania produktów LiDAR*, Warszawa 2015, s. 12-56, 80-93.
- [19] <http://www.codgik.gov.pl/index.php/zasob/baza-danych-obiektow-topograficznych.html> (dostęp: 04.06.2017 r.).
- [20] [http://www.isok.gov.pl/dane/web\\_articles\\_files/189/05-p-wozniak-bazy-danych-georeferencyjnych-w-isok.pdf](http://www.isok.gov.pl/dane/web_articles_files/189/05-p-wozniak-bazy-danych-georeferencyjnych-w-isok.pdf) (dostęp: 03.06.2017 r.).
- [21] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego z dnia 9 listopada 2011 (Dz. U. Nr 263, poz. 1572).

### **3D BUILDING MODELLING TOO NEEDS OF THE INDEXATION OF THE URBAN LANDSCAPE WITH USING VISIBILITY ANALYSES ON THE EXAMPLE OF CRACOW**

#### **S u m m a r y**

Protecting landscape values in cities, especially in terms of taking into account historical monuments, is an important issue for urbanists and planners in creating urban silhouettes. In these types of issues, visibility analysis is often used to simulate a view from a selected location based on digital terrain models (DTM) and digital surface model (DSM). Therefore, work has been undertaken on the problem of 3d building modeling in the aspect of optimizing the digital surface model using airborne laser scanning data. Three variants of building models have been proposed for this type of analysis: the first based on the triangulated irregular network model (TIN) and two variants using different type of detail multipatch objects (LoD1 and quasi-LoD2). In the process of generating them, information from the classified cloud of points and outlines of buildings from the BDOT10k topographic base was used. Other components of the land cover (mainly vegetation) and terrain surface were included in analysis as the TIN model. Wawel's Hill, one of the most characteristic places of Krakow's landscape, was chosen as the research area. Using the line of sight algorithm, the impact of building modeling on the results of the visibility analysis was examined. As a result, the superiority of multipatch-based solutions was found, mainly because of the simplicity of their implementation with respect to the TIN model, without losing the accuracy of the building models. It has also been found that the specificity of such objects does not significantly affect the results obtained, mainly due to the large area analysis during urban landscape assessment studies.

**Keywords:** airborne laser scanning, tin, multipatch feature, line of sight

*Przesłano do redakcji: 26.06.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Piotr BANASIK<sup>1</sup>  
Anna NĘDZA<sup>2</sup>

## MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA MODELU QUASI-GEOIDY W NIWELACJI

Integracja niwelacji klasycznej, realizowanej za pomocą niwelatora z niwelacją satelitarną, realizowaną za pomocą odbiornika GNSS jest możliwe po uwzględnieniu zmian w odstępach (undulacji) geoidy lub quasi-geoidy od elipsoidy. Informację o undulacji zawarta jest w modelach tych powierzchni. Do integracji wykorzystuje się modele zwane niwelacyjnymi, czyli dopasowane do osnowy wysokościowej. W referacie podjęto próbę przeanalizowania aktualnego modelu quasi-geoidy opracowanego dla obszaru Polski, ze względu na możliwości jego wykorzystania w niwelacji. Efektem analizy są odpowiednie kartogramy, które w inny sposób ilustrują undulację quasi-geoidy. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie dodatkowych informacji o warunkach zastępowania różnic wysokości normalnych różnicami wysokości elipsoidalnych. Taka informacja może być przydatna w przypadku projektowania osnow wysokościowych lub ich pomiaru z użyciem techniki GNSS (np. niwelacja wykonywana przez przeszkody terenowe).

**Słowa kluczowe:** model quasi-geoidy, niwelacja, niwelacja satelitarna, GNSS

### 1. Wstęp

Niwelacja jest metodą pomiaru różnic wysokości między dwoma punktami terenowymi. Za ich pomocą możliwe jest obliczenie wysokości punktów w przyjętym systemie wysokościowym, w ramach przyjętego poziomu odniesienia wysokościowego (poziomu morza). Za poziom odniesienia można przyjąć specjalnie opracowany model geoidy lub quasi-geoidy. W Polsce obowiązuje system wysokości normalnych odniesiony do poziomu morza Bałtyckiego (układ wysokości Kronsztadt86) oraz morza Północnego (układ wysokości EVRF2007), a modelem poziomu odniesienia jest przyjęty model quasi-geoidy [1]. Niezależnie od wysokości normalnych (H) w praktyce geodezyjnej wykorzystywane są rów-

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Piotr Banasik, AGH w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Geodezji Zintegrowanej i Kartografii, pbanasik@agh.edu.pl

<sup>2</sup> Anna Nędza, absolwentka Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, AGH w Krakowie, anna\_n@onet.pl

niez wysokości elipsoidalne ( $h$ ), zdefiniowane w układach odniesienia ETRF89 lub ETRF2000, jako odległości punktów terenowych od powierzchni elipsoidy GRS80, mierzone wzdłuż normalnej do tej powierzchni. Różnice wysokości elipsoidalnych ( $\Delta h$ ) otrzymuje się jako wynik opracowania względnych obserwacji GNSS, które w aspekcie wysokościowym często określa się pojęciem „niwelacji satelitarnej”, w przeciwieństwie do „niwelacji klasycznej” realizowanej za pomocą niwelatora. Związek obu rodzajów wysokości lub obu rodzajów różnic wysokości odbywa się poprzez znane położenie quasi-geoidy względem elipsoidy, czyli poprzez specjalnie opracowany model quasi-geoidy. Dopasowanie tego modelu do obowiązującego układu wysokości i układu odniesienia sprawia, że możliwe jest jego wykorzystanie w pomiarach niwelacyjnych.

Opracowanie coraz dokładniejszych modeli geoidy lub quasi-geoidy jest nadal podstawowym zadaniem realizowanym w skali globalnej [2] lub lokalnej, krajowej [3], [4], [5], [6]. Brak jest jednak opracowań, które analizowałyby dany model pod kątem jego wykorzystania w praktycznych zadaniach geodezyjnych, np. w niwelacji. Ponadto istniejące modele prezentowane są najczęściej w postaci wzniesienia geoidy lub quasi-geoidy nad elipsoidą, która to postać nie ujawnia zróżnicowanych warunków zastosowania takiego modelu w pracach niwelacyjnych. W związku z tym podjęto próbę analizy jednego z najnowszych modeli opracowanym dla obszaru Polski. Efektem prac jest nowy sposób prezentacji krajowego modelu quasi-geoidy, który ułatwia integrację klasycznej, naziemnej i satelitarnej niwelacji.

## 2. Niwelacja z wykorzystaniem modelu quasi-geoidy

Niwelacja z wykorzystaniem quasi-geoidy polega na zastąpieniu pomiaru wykonywanego niwelatorem, pomiarem GNSS z uwzględnieniem modelu quasi-geoidy. Można to zrealizować kilkoma sposobami:

– najprostszym sposobem jest realizacja związku między wysokością normalną ( $H$ ) i elipsoidalną ( $h$ ) [7]:

$$H = h - \zeta(\varphi, \lambda) \quad (1)$$

gdzie:  $\zeta(\varphi, \lambda)$  jest odstępem quasi-geoidy od elipsoidy w punkcie o współrzędnych  $\varphi, \lambda$ .

Wadą tego sposobu jest mniejsza dokładność odstępu  $\zeta$  w stosunku do potencjalnie dokładniejszych wysokości  $h$  oraz  $H$ . Z kolei zaniechanie  $\zeta$  na obszarze Polski nie jest możliwe, ze względu na jego wartość, zawierająca się w granicach od 27 m do 44 m [3]. Ponadto realizacja zależności (1) wymaga dopasowania modelu  $\zeta(\varphi, \lambda)$  do aktualnie obowiązującego układu wysokości normalnej ( $H$ ) i układu odniesienia dla wysokości elipsoidalnej ( $h$ ). W sytuacji wprowadzenia nowego układu wysokości lub układu odniesienia, stosowany dotychczas model należałoby uzupełnić o odpowiednie poprawki:

– zdecydowanie lepszym rozwiązaniem jest stosowanie zależności typowo niwelacyjnej, w postaci (2):

$$\Delta H = \Delta h - \Delta \zeta(\varphi, \lambda) \quad (2)$$

Niezgodność układów wysokości z układami użytymi do opracowania modelu quasi-geoidy jest w tym wypadku eliminowana. Pozostaje problem mniejszej dokładności przyrostu odstępów  $\Delta \zeta$ , w stosunku do dokładności  $\Delta H$  i  $\Delta h$ . Wartość  $\Delta \zeta$  można obliczyć na podstawie lokalnego nachylenia  $\Theta$  quasi-geoidy do elipsoidy, w azymucie  $\alpha$ , na krótkim odcinku  $s$  [7]:

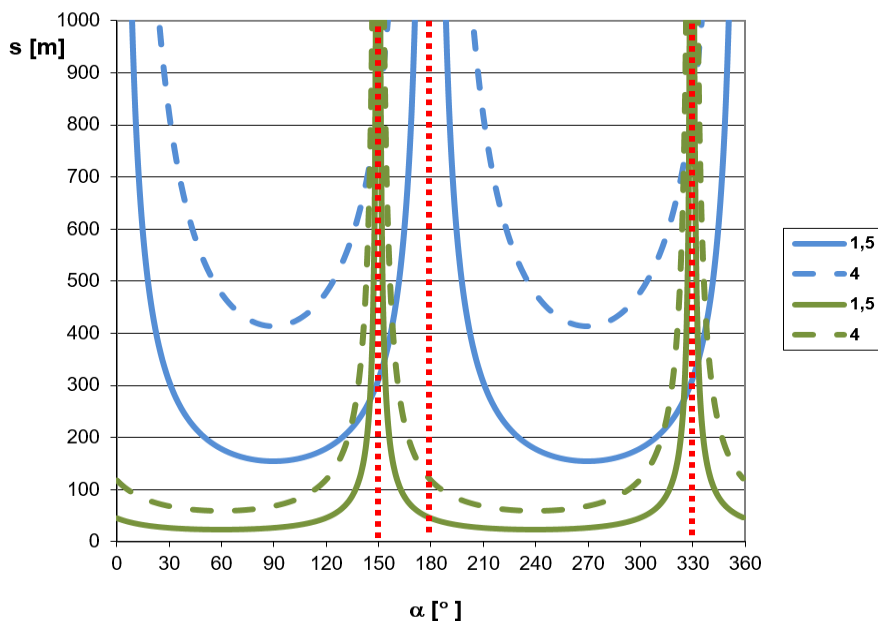
$$\Delta \zeta = \Theta \cdot s = (\xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha) \cdot s \quad (3)$$

gdzie:  $\xi, \eta$  są składowymi nachylenia odpowiednio w azymutach  $\alpha=0$  i  $\alpha=\pi/2$ .

Pierwszy z ww. sposobów wskazuje na pewną cenną własność modelu quasi-geoidy. W przypadku sieci niwelacyjnych zlokalizowanych na obszarach podlegających powierzchniowym deformacjom (np. obszary górnicze), gdzie w krótkim czasie zmienia się o  $dh$  lub  $dH$  pionowe położenie punktów geodezyjnych, wartości tych zmian będą identyczne dla wysokości elipsoidalnej jak i dla wysokości normalnej ( $dh=dH$ ). W związku z tym, zgodnie z (1) model quasi-geoidy  $\zeta(\varphi, \lambda)$  pozostanie bez zmian – jest niezależny od deformacji terenu. Wynika z tego wniosek, że tworzenie modelu quasi-geoidy (lub geoidy) na takich niestabilnych obszarach jest wskazany, podobnie jak zastępowanie długotrwałego klasycznego pomiaru niwelacyjnego, zdecydowanie szybszym pomiarem GNSS.

Drugi z ww. sposobów posiada inną ciekawą własność. Z zależności (3) wynika, że dla dowolnych wartości  $\xi, \eta$  istnieje taki kierunek  $\alpha$ , w którym nachylenie  $\Theta$  jest zerowe, a tym samym zerowa jest wartość  $\Delta \zeta$ . W takim kierunku pomierzona różnica wysokości elipsoidalnych  $\Delta h$  jest na podstawie (2) równa różnicy wysokości normalnych  $\Delta H$ . Zatem w takim kierunku obie techniki niwelacyjne powinny dawać ten sam wynik, a korzystanie z modelu ograniczone jest do określenia tego szczególnego kierunku [8]. Ilustracją zależności (3) są wykresy na rys. 1. Przedstawiono na nich wartości przyrostu odstępów  $\Delta \zeta$  o wartości 1.5mm i 4mm w dwóch rejonach Polski, charakteryzujących się ekstremalnymi wartościami nachylenia quasi-geoidy do elipsoidy. W rejonie Malborka (woj. pomorskie) nachylenie osiąga minimalną wartość ( $\xi=0''$  i  $\eta=2''$ ). Wykresy dla tego obszaru sporządzono w kolorze niebieskim. Z kolei w rejonie Krasnegostawu (wuj. lubelskie) nachylenie quasi-geoidy do elipsoidy jest maksymalne ( $\xi=7''$  i  $\eta=12''$ ).

Z wykresów na rys. 1 wynika, że dla pierwszego z ww. obszarów (wykres niebieski), wartość przyrostu odstępów  $\Delta \zeta=1,5$  mm na odległości  $s=1$  km można osiągnąć w azymucie ok.  $180^\circ$  (lub  $0^\circ$ ), a dla drugiego obszaru (wykres zielony) w azymucie ok.  $150^\circ$  ( $330^\circ$ ). Te szczególne azymuty zaznaczono czerwoną, kropkowaną linią. Warto jednak zauważyć, że azymut  $180^\circ$  można zrealizować ze znacznie mniejszą dokładnością niż azymut  $150^\circ$  (większa odległość na osi azymutu między linią wykresu a linią azymutu).



Rys. 1. Zmiany  $\Delta\zeta$  w rejonie Malborka i Krasnegostawu [mm]

Fig. 1. Variation of  $\Delta\zeta$  in the area of Malbork and Krasnystaw [mm]

Dla  $\Delta\zeta=4$  mm taka tolerancja azymutu jest jeszcze większa. Z powyższych rozważań wynika wniosek, że te same dokładności przyrostu odstepu łatwiej jest uzyskać na obszarach o minimalnym nachyleniu quasi-geoidy do elipsoidy niż na obszarach o dużym nachyleniu. Warto także zwrócić uwagę, że wartość 1,5 mm lub 4 mm na odcinku 1km odpowiada dokładności niwelacji, odpowiednio w wysokościowej osnowie podstawowej lub szczegółowej. Konfrontując ten wniosek z zależnością (2) można zauważyć, że pomiar  $\Delta h$  w kierunku bliskim azymutowi  $180^\circ$  w rejonie Malborka odpowiada pomiarowi  $\Delta H$  z dokładnością niwelacji odpowiedniej klasy.

### 3. Inna prezentacja modelu quasi-geoidy

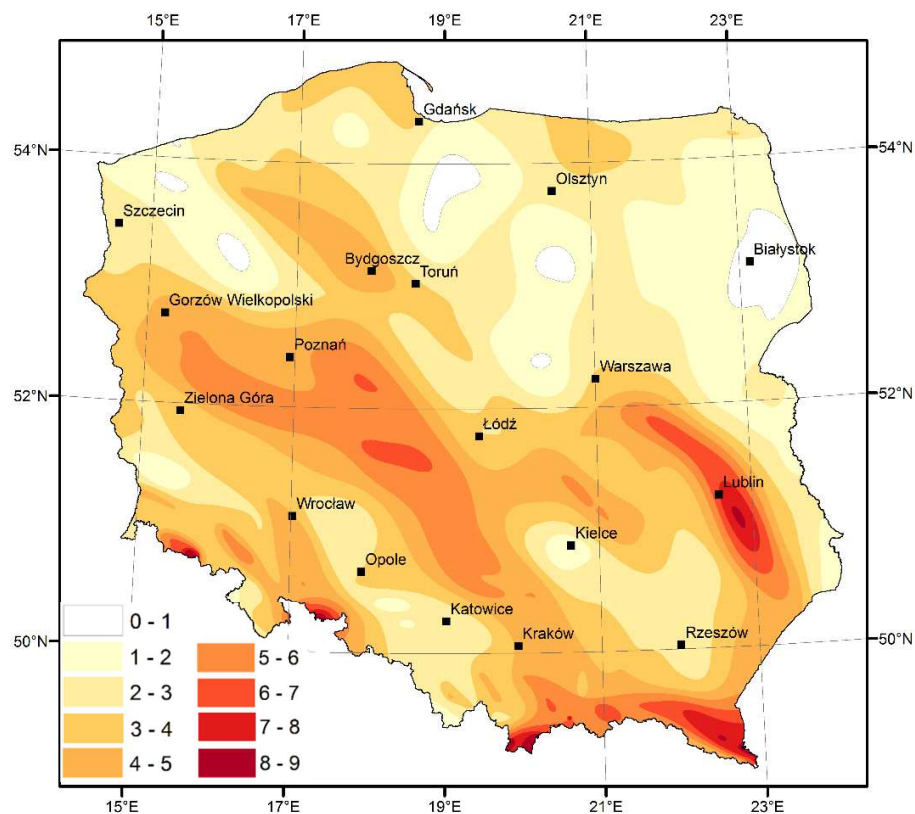
Informacja o zróżnicowanym nachyleniu quasi-geoidy do elipsoidy, którą wykorzystano do analiz w poprzednim rozdziale wydaje się być cenna z punktu widzenia wykorzystania modelu quasi-geoidy w niwelacji. Obecnie modele quasi-geoidy (lub geoidy) prezentowane są w postaci kartogramu izolinii  $\zeta=\text{const.}$  np. [2], [9]. Na takich kartogramach można na podstawie przebiegu izolinii wskazać prawdopodobne obszary, gdzie nachylenie ww. powierzchni jest większe lub mniejsze. Nie jest to jednak widoczne wprost na kartogramie, a określenie tego nachylenia w postaci  $\Delta\zeta$  na 1 km, która to postać najlepiej oddaje moż-



liwości wykorzystania modelu quasi-geoidy w niwelacji - nie jest możliwe. W związku z tym sporządzono alternatywny kartogram przebiegu quasi-geoidy prezentujący tą powierzchnię w postaci izolinii maksymalnego nachylenia  $\Delta\zeta_{\max}$  (rys. 2). Kartogram sporządzono na podstawie modelu GeoidPol\_2008CN, z którego pobrane składowe  $\xi, \eta$  przeliczono na maksymalne nachylenie  $\Theta_{\max}$  zgodnie z zależnością (4):

$$\Delta\zeta_{\max/1km} = \Theta_{\max} \cdot 1km = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \cdot 1km \quad (4)$$

Wartości maksymalnego nachylenia  $\Delta\zeta_{\max/1km}$  obliczono w niemal 80 tysiącach węzłów siatki o oczku  $2km \times 2km$ , pokrywającej cały obszar kraju. Interpolację izolinii zrealizowano metodą krigingu, z opcją wygładzenia. Na tak przedstawionym modelu quasi-geoidy wyraźnie widać wyróżniający się, wcześniej analizowany rejon Krasnegostawu (rys. 2). Podobne, największe nachylenie quasi-



Rys. 2. Maksymalne nachylenie quasi-geoidy na obszarze Polski [cm/km]

Fig. 2. Maximum quasigeoid slope in Poland [cm/km]

geoidy do elipsoidy występuje na południowych krańcach Polski, co jest typowe dla terenów górskich. Nieco mniejsze nachylenie występuje w centralnej Polsce między Łodzią a Wrocławiem (szczególni rejon powiatu ostrzeszowskiego). Z kolei minimalne nachylenie poza rejonem Malborka występuje również w innych częściach północnej Polski (okolice Białegostoku na wschodzie, Mławy w centrum, Mirosławca i Golczewa na zachodzie). W tych rejonach najłatwiej jest zastępować niwelację klasyczną niwelacją satelitarną.

#### 4. Podsumowanie

Informację o przebiegu quasi-geoidy (lub geoidy) względem powierzchni elipsoidy można w naturalny i prosty sposób związać z wynikami pomiarów niwelacyjnych i GNSS, poprzez wysokość normalną (lub ortometryczną) i wysokość elipsoidalną. Dokładność modeli tej powierzchni stale wzrasta i obecnie dorównuje dokładnościom niwelacji geometrycznej wyższych klas. Stąd pojawia się możliwość jej wykorzystania do niwelacji zwłaszcza realizowanej w gorszych dla klasycznej niwelacji warunkach pomiarowych. W związku z tym istnieje potrzeba innego niż dotychczasowy sposobu prezentacji tej powierzchni. Zamiast modelu anomalii wysokości, czyli odstępu quasi-geoidy od elipsoidy zaproponowano model przyrostów tej anomalii. Jest on związany z nachyleniem quasi-geoidy do elipsoidy, które w praktyce umożliwia uzupełnienie przewyższenie niwelacyjnego ( $\Delta H$ ) do przewyższenia elipsoidalnego ( $\Delta h$ ). Na obszarach charakteryzujących się minimalnymi przyrostami anomalii wysokości zastępowanie niwelacji naziemnej niwelacją GNSS, jest zdecydowanie łatwiejsze w realizacji. Na opracowanym kartogramie modelu quasi-geoidy wyraźnie wyodrębniono takie obszary. Minimalnym nachyleniem charakteryzuje się północna część Polski. Z kolei w części wschodniej, a także centralnej nachylenie to jest maksymalne. Informacja wynikająca z tak zaprezentowanego modelu quasi-geoidy może być cenna np. w przypadku niwelowania w trudnych warunkach pomiarowych (przeszkody terenowe, duża deniwelacja, itp.), gdzie wskazane jest korzystanie z obu ww. technik niwelacyjnych. Zaprezentowany w pracy nowy model quasi-geoidy jest kompilacją modelu krajowego, pod kątem jego lepszego wykorzystania w geodezji. Podany sposób jego opracowania można stosować w przypadku kolejnych, dokładniejszych modeli quasi-geoidy, które powstaną w przyszłości.

*Praca wykonana w ramach badań statutowych AGH: 11.11.156.444*

#### Literatura

- [1] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych, Dz.U. 2012, poz. 1247.
- [2] <https://www.ngs.noaa.gov/GEOID/models.shtml> {dostęp 20.11.2017 r.}.

- [3] Pażus R., Osada E., Olejnik S.: Geoida niwelacyjna 2001, Geodeta nr 5/2002, Warszawa 2002, s. 10-17.
- [4] Kryński J.: Końcowy raport merytoryczny z wykonania projektu zamawianego PBZ-KBN-081/T12/2002 Utworzenie modelu „centymetrowej” geoidy na obszarze Polski w oparciu o dane geodezyjne, grawimetryczne, astronomiczne, geologiczne i satelitarne, Instytut Geodezji i Kartografii, Raport dla Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Warszawa 2006.
- [5] [http://www.geonet.net.pl/images/2013\\_08\\_geoidpol\\_2008CN.pdf](http://www.geonet.net.pl/images/2013_08_geoidpol_2008CN.pdf) {dostęp 20.11.2017 r.}.
- [6] Szelachowska M., Kryński J., (2014): GDQM-PL13 – the new gravimetric quasi-geoid model for Poland, Geoinformation Issues, Vol. 6, No 1, Warsaw, pp. 5-19.
- [7] Heiskanen W. A. and Moritz H.: Physical Geodesy. W. H. Freeman and Company, San Francisco 1967.
- [8] Banasik P.: Quasigeoid on chose areas of investigations geodynamics, Acta Geodynamica.Geomater.Vol.4, No.4, 2007, pp. 133-140.
- [9] <http://www.igik.edu.pl/pl/cgig-modele-geoidy> {dostęp 20.11.2017 r.}.

## POSSIBILITIES OF USING QUASIGEOID MODEL IN LEVELLING

### Summary

Integration between classical, executed by a levelling instrument, and satellite levelling, executed by a GNSS receiver, is possible after considering changes in deviations (undulations) between the geoid or quasi-geoid and the ellipsoid. Information about undulation is included in the geoid or quasi-geoid models. For integration, are used models which are fit to the vertical control points (benchmarks). The paper attempts to analyse the current quasi-geoid model developed for the territory of Poland in regard to its use in levelling. The results of the analysis are the corresponding cartograms, which in a different way illustrate the quasi-geoid undulation. This makes it possible to obtain additional information about the conditions for replacing normal height differences with ellipsoidal heights differences. This information may be useful for the design of vertical control points or their measurement using GNSS technology (e.g. levelling throughout field obstacles).

**Keywords:** quasigeoid model, classical levelling, satellite levelling, GNSS

*Przesłano do redakcji: 19.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Marek NALEPKA<sup>1</sup>

## MONITOROWANIE USZKODZEŃ W RAMIE ŻELBETOWEJ

W artykule przedstawiono próbę wytypowania współczynników, które dodatkowo poza obrazem współczynników falkowych pozwalałyby stwierdzić, czy w konstrukcji doszło do postępującego uszkodzenia względem znanego stanu oraz wpływu uszkodzenia na konstrukcję (spadku właściwości dynamicznych). W celu określenia wpływu uszkodzenia na odpowiedź konstrukcji posłużono się numerycznym modelem żelbetowej ramy portalowej poddanej testom o wzrastającej sile wymuszenia sejsmicznego podłoża. Wykorzystano w modelu nieliniowość konstrukcji w formie nieliniowości materiałowej (nieliniowe związki konstytutywne) jak i geometrycznej. Odpowiedź przyśpieszeniową konstrukcji przetworzono za pomocą ciągłej transformaty falkowej (z wykorzystaniem falki-matki Morlet) reprezentującej analizowany sygnał w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej. Określone współczynniki (pikowy, asymetrii oraz rozproszenia) wytypowane na podstawie zapisu odpowiedzi z użyciem transformaty falkowej pomogły określić chwilę czasową wystąpienia uszkodzenia i spadek sztywności uszkodzonej konstrukcji odzwierciedlony w spadku jej częstotliwości drgań własnych. Następnie za pomocą wytypowanych współczynników przeanalizowano zapis odpowiedzi ramy żelbetowej badanej doświadczalnie, która poddana została testom na stole wstrząsowym w ISMES, które miały na celu określenie wpływu uszkodzenia na właściwości dynamiczne konstrukcji żelbetowych. Zaproponowane współczynniki pozwoliły na powiązanie zmiany ich wartości z powstałym uszkodzeniem poprzez porównanie zmiany właściwości dynamicznych ze zmianą wytypowanych współczynników wrażliwych na uszkodzenie. Współczynnik pikowy bezpośrednio powiązany z częstotliwością drgań własnych wskazywał chwilę czasową wystąpienia uszkodzenia, zmienne wartości współczynnika asymetrii i rozproszenia wskazywały trend zmian wraz z rozwojem tego uszkodzenia.

**Słowa kluczowe:** nieliniowa praca konstrukcji, analiza falkowa, właściwości dynamiczne, odpowiedź konstrukcji, transformata falkowa

### 1. Wstęp

Monitorowanie i wykrywanie uszkodzeń konstrukcji (SHM – *Structural Health Monitoring*) jest współczesnym wyzwaniem inżynierskim, które może wpływać istotnie na bezpieczeństwo użytkowania obiektów budowlanych.

---

<sup>1</sup> Marek Nalepka, Politechnika Opolska, Katedra Mechaniki, Konstrukcji Budowlanych i Inżynierskich, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole; tel. 774498000; m.nalepka@po.opole.pl

Wpływ trzęsienia ziemi na konstrukcję, z uwagi na swój nagły charakter oddziaływania i katastrofalne skutki jakie wywołać mogą uszkodzenia, jest bardzo ważnym zagadnieniem współczesnej inżynierii. Natychmiastowe rozpoznanie uszkodzenia, jego lokalizacji i wielkości, jest kluczowe przy ocenie zagrożenia i zapobieganiu dalszym stratom i propagacji uszkodzeń, wpływa również bezpośrednio na decyzję dotyczącą napraw i renowacji obiektów. Stosowane aktualnie metody monitorowania konstrukcji wymagają jednak stałego dostępu do konstrukcji i miejsca w którym uszkodzenie mogło wystąpić. Ograniczenia te doprowadziły do opracowania technik monitorowania konstrukcji i detekcji uszkodzeń w oparciu o zmiany charakterystyk dynamicznych konstrukcji, np. poprzez pomiar drgań [1, 2].

## 2. Analiza częstotliwościowa odpowiedzi konstrukcji

Analiza modalna przeprowadzana jest w dziedzinie czasu, dlatego większość obecnych systemów SHM wdraża zastosowanie transformaty Fouriera (FT – *Fourier Transform*). FT jest używana do rozkładu sygnału w dziedzinie czasu w celu określania głównych charakterystyk dynamicznych konstrukcji, takich jak częstotliwość drgań własnych. Problemem w stosowaniu FT jest to, że wynikiem analizy jest podsumowanie charakterystyki dynamicznej na całej długości sygnału, natomiast nie ma możliwości określenia miejsca w którym charakterystyka dynamiczna sygnału mogła ulec zmianie [3].

### 2.1. Ciągła transformata falkowa

Narzędziem, które bazuje na FT jest bezpośrednim rozwinięciem tych metod, jest transformata falkowa. Ciągła transformata falkowa (CWT - *Continuous Wavelet Transform*) sygnału, w dziedzinie czasu zdefiniowana jest w następujący sposób:

$$CWT(t, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \gamma\left(\frac{\tau-t}{a}\right) d\tau \quad (1)$$

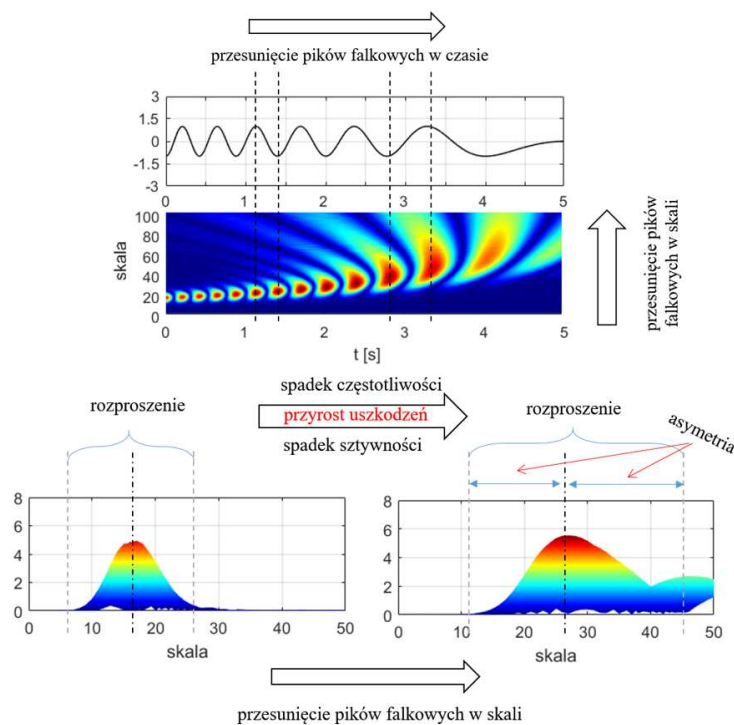
gdzie:  $t$  – chwila czasowa badanego sygnału;  
 $x(\tau)$  – analizowany sygnał;  
 $y(t)$  – bazowa funkcja filtrująca, tzw. funkcja matka;  
 $a$  – skala funkcji matki.

Transformata falkowa, odgrywa znaczącą rolę w wykrywaniu uszkodzeń w konstrukcji. Zastosowanie odpowiedniej rodziny funkcji bazowej filtrującej sygnał (tzw. matki falki) pozwala wykryć chwilową zmienność sygnału poddanego analizie [4]. Analizowanym sygnałem może być dowolna wielkość, będąca odpowiedzią konstrukcji na obciążenie, np. krzywizna elementu [5] czy zapis przyspieszeń [6]. Dodatkową zaletą stosowania CWT jest wykrywanie zmienno-

ści analizowanej wielkości i/ oraz, w zależności w jakiej dziedzinie jest poddawana analizie odpowiedź, wyznaczenie lokalizacji lub chwili czasowej powstania uszkodzenia [7]. W analizie sygnałów odpowiedzi, uzyskanych poprzez symulacje dynamiczne, wybrano falkę matkę tzw. Morlet wavelet, która została pierwotnie wprowadzona do analizy zapisów sejsmicznych [8]. Falka Morlet używana jest obecnie w różnych zastosowaniach, w tym z powodzeniem do mechanicznego diagnozowania uszkodzeń [5, 6].

### 3. Opis uszkodzeń konstrukcji przy użyciu CWT

Analiza CWT sygnału odpowiedzi pozwala graficznie przedstawić odpowiedź konstrukcji (w formie skalogramu), w związku z tym analiza obrazu współczynników falkowych może bezpośrednio informować o zachowaniu się konstrukcji pod wpływem uszkodzenia. Częstotliwość drgań własnych konstrukcji odzwierciedlona jest w obrazie pików wartości współczynnika falkowego [6, 9, 10]. Na tej podstawie sformułowano współczynnik pikowy (*PC-Peak Coefficient*). Informacja o uszkodzeniu bezpośrednio może odzwierciedlać się



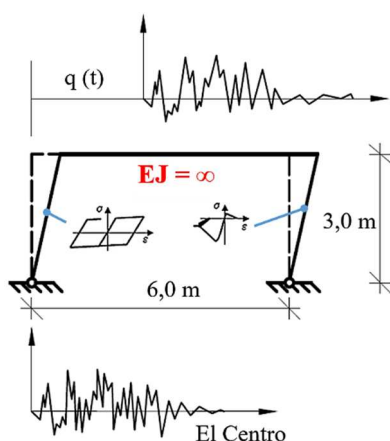
Rys. 1. Przebieg zmienności przestrzennego obrazu współczynników falkowych w zależności od propagacji uszkodzenia

Fig. 1. Changes in the scalogram of wavelet coefficient according to the damage propagation

w rozproszeniu współczynnika falkowego. W tym celu wytypowano współczynnik rozproszenia (DC - *Dispersion Coefficient*). Analogicznie sformułowany został współczynnik asymetrii (AC - *Asymmetry Coefficient*), który obrazuje niesymetryczne rozproszenie współczynnika falkowego w skali (rys. 1).

#### 4. Symulacja numeryczna

W celu rozpoznania możliwości stosowania powyższych współczynników wrażliwych na uszkodzenie posłużono się programem OpenSees przeznaczonym głównie do modelowania konstrukcji w zakresie nieliniowym (geometrycznym jak i materiałowym) obciążonych w sposób dynamiczny [11]. Model numeryczny zastosowany do wytypowania współczynników stanowiła żelbetowa rama portalowa (rys. 2). Rygiel ramy został przyjęty jako element o nieskończonej sztywności w celu koncentracji wpływu zginania na słupy. W modelowaniu przekroju poprzecznego słupów ramy wykorzystano materiały o nieliniowych związkach konstytutywnych: steel01 [12] dla stali zbrojeniowej, concrete02 [13] dla żelbetu (nazewnictwo zaczerpnięte z biblioteki programu).



Rys. 2. Analizowana rama portalowa

Fig. 2. Analyzed portal frame

Symulacja numeryczna polegała na analizie czasowej konstrukcji (Time History Analysis) z wykorzystaniem wzorcowego wymuszenia sejsmicznego – El Centro [14]. Analizę przeprowadzano etapami. Każdy etap polegał na zwiększeniu siły wymuszenia w celu osiągnięcia uszkodzenia w konstrukcji. Wyniki przedstawione na rys. 3 i 4 przedstawiają wykresy zmienności współczynników falkowych i wytypowanych współczynników wrażliwych na uszkodzenie (punkt 3) dla wybranych trzech stanów uszkodzenia: ramy nieuszkodzonej (odpowiedź liniowa), umiarkowanego uszkodzenia oraz silnego uszkodzenia, powyżej której którego w modelu numerycznym dochodziło do zniszczenia konstrukcji.



#### 4.1. Współczynniki wrażliwe na uszkodzenie

Odpowiedź konstrukcji (w zakresie przyspieszeń) uzyskana z wytypowanych stanów uszkodzenia została poddana analizie CWT w celu pozyskania i potwierdzenia słuszności wytypowania współczynników wrażliwych na uszkodzenie.

Wykresy zapisu przyspieszeń konstrukcji przedstawiono na rys. 3a wraz z wykresami przedstawiającymi obraz współczynników falkowych (skalogramów) (rys. 3b). Wykresy wytypowanych współczynników wrażliwych na uszkodzenie przedstawiono na rys. 3c, 4a oraz na rys. 4b.

Współczynnik PC przedstawiono na rys. 3c. Śledzenie przemieszczenia pików falkowych pozwala zaobserwować chwile wystąpienia uszkodzenia, którego efektem jest spadek częstotliwości drgań własnych i tym samym przesunięcie w pików falkowego w dziedzinie skali.

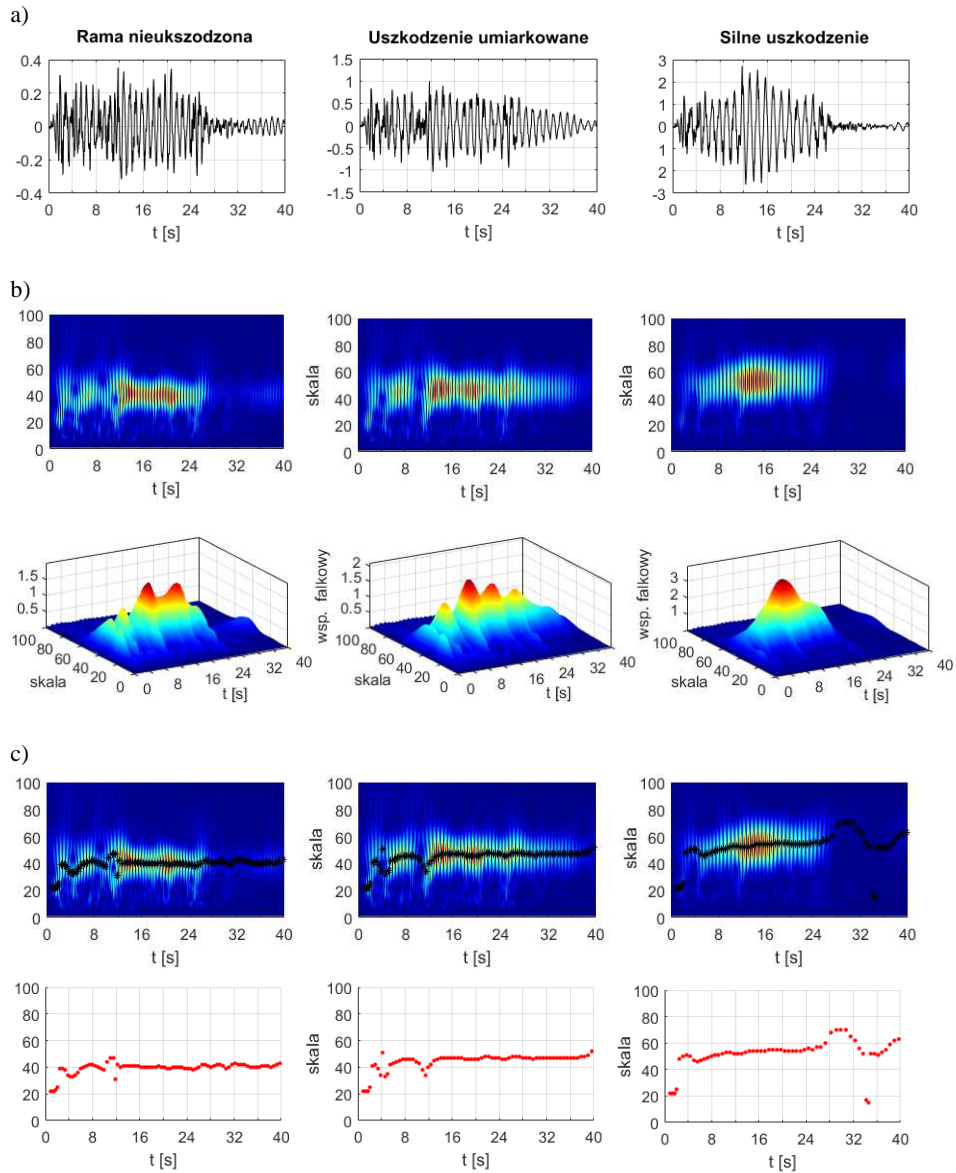
Współczynnik DC przedstawiono na rys. 4a, wykres przedstawia wartości współczynnika dla całego sygnału, oraz wartości współczynnika zawężone do pików falkowych z wartością średnią (czerwona linia). Zauważyć można że rozwój uszkodzenia wpływa na wzrost wartości współczynnika (zmiana wartości dla poszczególnych pików falkowych oraz średniej wartości współczynnika).

Wartości współczynnika AC pokazano na rys. 4b. Współczynnik AC nie wskazuje bezpośrednio chwili wystąpienia uszkodzenia można stwierdzić, że wpływ uszkodzenia uwidacznia się w spadku wartości współczynnika. Wartości średnie współczynników DC i AC wraz z wartością główną częstotliwości drgań własnych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zmienność podstawowej częstotliwości drgań własnych oraz średnich wartości współczynników wrażliwych na uszkodzenie

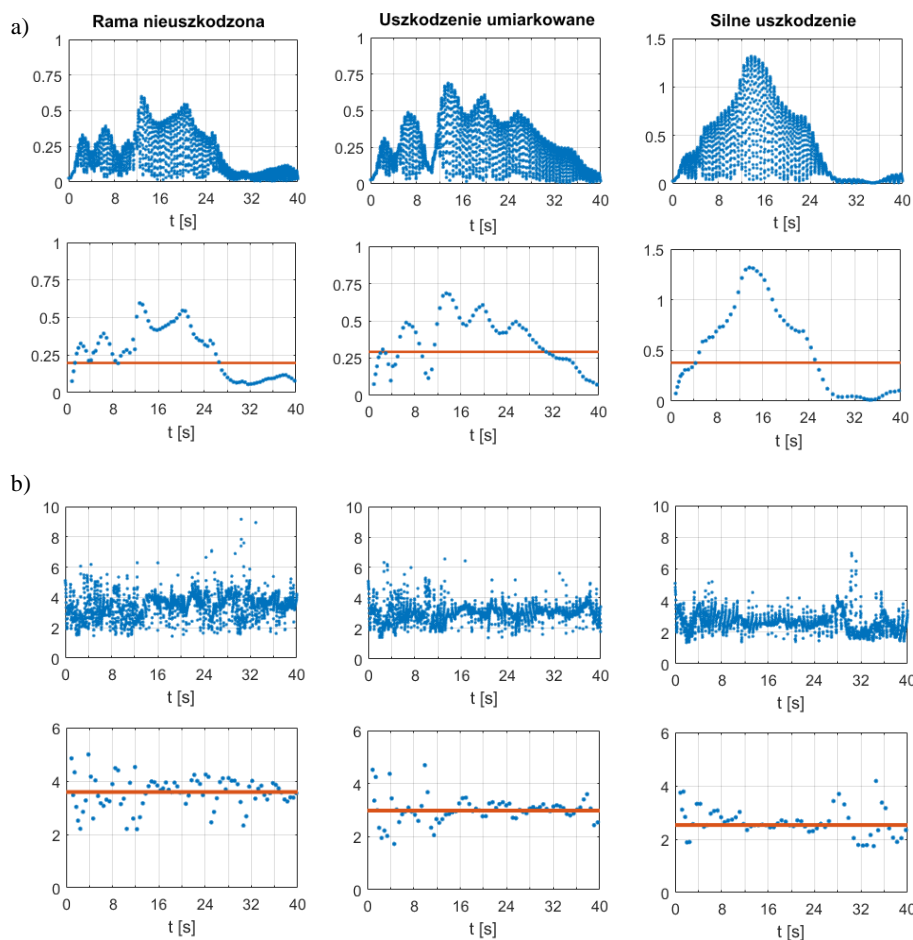
Table 1. Variability of the first natural frequency of portal frame connected to the mean values of the damage-sensitive coefficient

		Nieuszkodzona „intact”	Uszkodzenie umiarkowane	Silne uszkodzenie
1.	Częstotliwość drgań własnych, [Hz]	1,02	0,86	0,75
2.	Współczynnik DC	0,198	0,292	0,379
3.	Współczynnik AC	3,592	2,983	2,531



Rys. 3. Wykresy: a) zapis odpowiedzi konstrukcji b) skalogram – przestrzenny obraz współczynników falkowych w dziedzinie czasu i skali c) przebieg zmiany położenia pików falkowych – współczynnik PC

Fig. 3. Graphs: a) response of the structure b) scalogram - spatial image of wavelet coefficients in the time and scale domain c) shift of the wavelet peak – Peak Coefficient

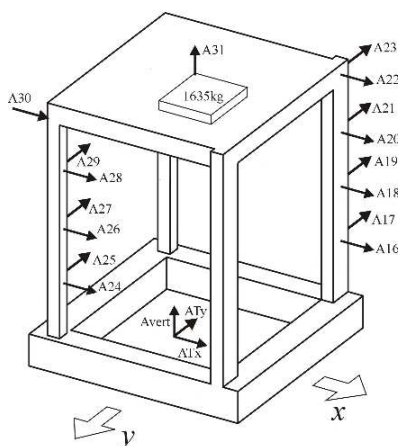


Rys. 4. Współczynniki wrażliwe na uszkodzenie dla trzech wytypowanych stanów uszkodzenia: a) wartości współczynnika DC oraz b) wartości współczynnika AC

Fig. 4. Damage-sensitive coefficient of the three chosen stages of damage: a) Dispersion Coefficient and b) Asymmetry Coefficient value (mean value – line)

## 5. Eksperyment

W latach 90. XX w. w Instytucie Mechaniki Eksperymentalnej (ISMES, Bergamo, Włochy) przeprowadzono eksperyment, który miał na celu określić wpływ zarysowania konstrukcji żelbetowych na ich charakterystyki dynamiczne. Badanie przeprowadzono na konstrukcji ramowej o wymiarach (w rzucie)  $3,4 \times 3,4$  m oraz wysokości 4,15 m. Konstrukcja posiadała jedną oś symetrii z uwagi na występowanie dwóch rodzajów słupów  $0,2 \times 0,2$  m oraz  $0,2 \times 0,4$  m (rys. 5). Do budowy użyto betonu odpowiadającego klasie C30/37 oraz stali zbrojeniowej włoskiej produkcji (Fe44K) [15].



Rys. 5. Schemat analizowanej ramy żelbetonowej na stole wstrząsowym z rozmieszczeniem akcelerometrów, na podstawie [15]

Fig. 5. Scheme of analysed r/c frames on the shaking table with locations of accelerometers, based on [15]

Eksperyment polegał na poddawaniu ramy pewnemu wymuszeniu sejsmicznemu na kierunkach  $x$ ,  $y$  o zwiększającej się intensywności określonej przez odpowiedni mnożnik zapisów przyspieszeń. Otrzymano kolejne stany uszkodzenia opisane przez szczytowe przyspieszenia wymuszeń (PGA - *Peak Ground Accelerations*) wynoszące od  $35,6 \text{ cm/s}^2$  do  $1090 \text{ cm/s}^2$  (tab. 2) [15].

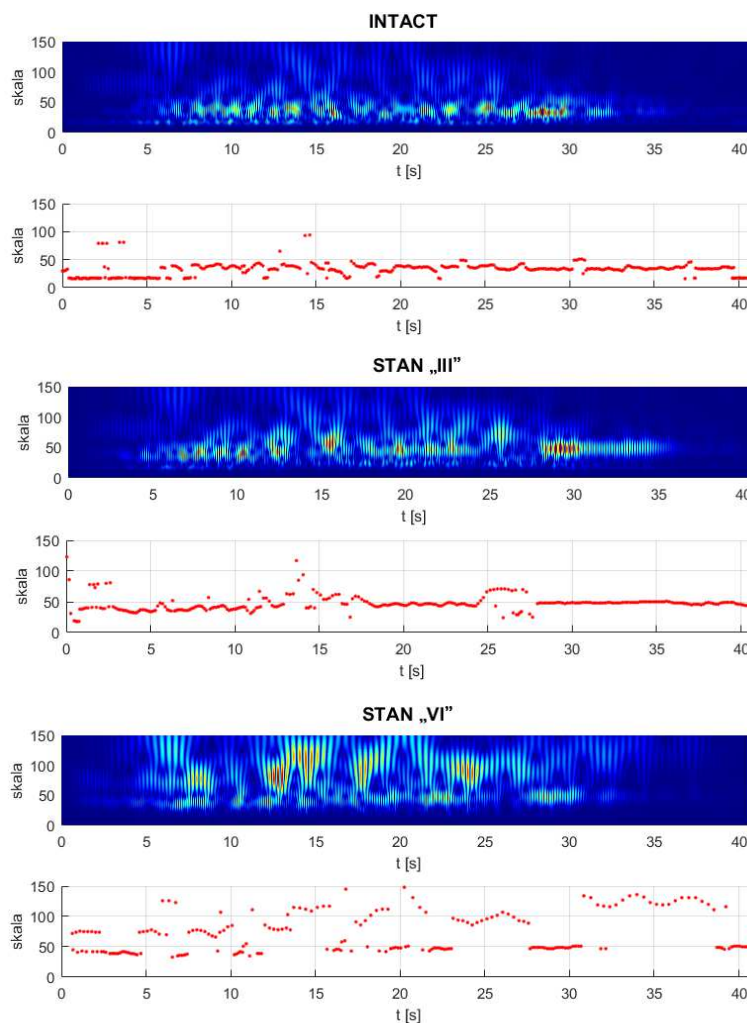
Tabela 2. Zmiany częstotliwości własnych w miarę rozwoju uszkodzenia, na podstawie [15]

Table 2. Changes in natural frequencies related to structural damage propagated, based on [15]

Lp.	Poziom wymuszeń	$f_1$	$f_3$	$f_2$
		Hz	Hz	Hz
1.	Rama nieuszkodzona (stan „0”)	4,69	5,32	10,16
2.	Stan „I” – PGA = $146 \text{ cm/s}^2$	4,20	4,98	9,77
3.	Stan „II” – PGA = $319 \text{ cm/s}^2$	2,83	3,61	7,52
4.	Stan „III” – PGA = $413 \text{ cm/s}^2$	2,44	3,22	6,54
5.	Stan „IV” – PGA = $644 \text{ cm/s}^2$	2,09	2,54	5,47
6.	Stan „V” – PGA = $843 \text{ cm/s}^2$	1,76	2,15	4,69
7.	Stan „VI” – PGA = $1090 \text{ cm/s}^2$	1,46	1,86	3,81

### 5.1. Współczynniki wrażliwe na uszkodzenie

Do analizy przydatności wytypowanych współczynników posłużono się zapisem odpowiedzi pochodzącym z czujnika A22 (lokalizacja według rys. 5) dla 3 stanów uszkodzenia: intact (rama nieuszkodzona), stan „III” (PGA =  $413 \text{ cm/s}^2$ ) oraz stan „VI” (PGA =  $1090 \text{ cm/s}^2$ ) (pogrubiona czcionka tabela 2). Odpowiedź konstrukcji została poddana analizie CWT z użyciem bazowej funkcji filtrującej - falki Morlet.



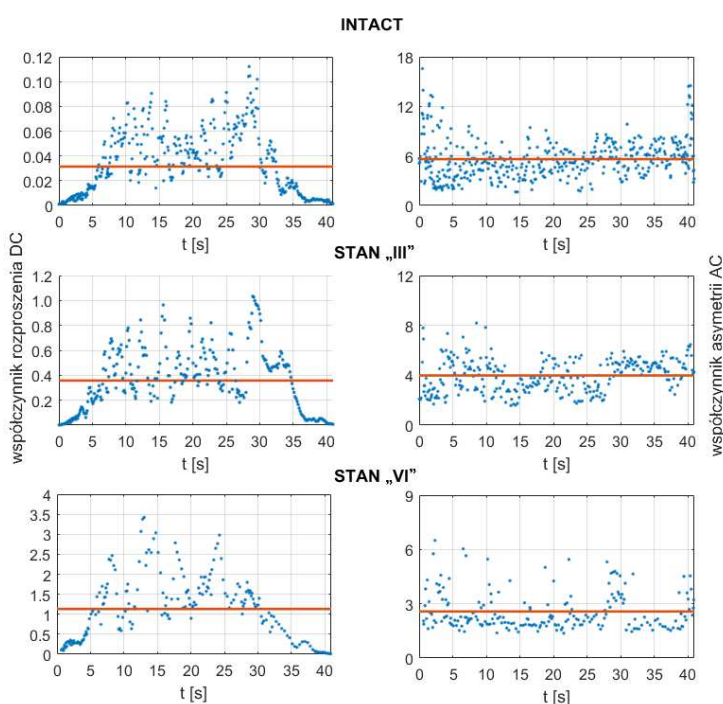
Rys. 6. Skalogram współczynników falkowych odpowiedzi ramy żelbetowej (czujnik A22) dla wytypowanych stanów uszkodzenia wraz z współczynnikiem PC

Fig. 6. Scalogram of wavelet coefficients of reinforced concrete frame response (accelerometer A22) for selected stages of damage with the Peak Coefficient

Scalogramy współczynników falkowych wraz ze współczynnikiem PC przedstawiono na rys. 6. Wraz z rozwojem uszkodzenia zauważyć można rozprzestrzenie się pików w skali, które związane jest z spadkiem sztywności i tym samym spadkiem częstotliwości drgań własnych konstrukcji (rys. 6). W odróżnieniu od wykresu zmiany położenia pików w symulacji numerycznej (rys. 3c) widoczne są główne pasma pików, które odpowiadają głównym dominującym częstotliwościom drgań układu. Wykresy zmienności współczynnika DC i współczynnika AC również zawężono do wartości dopowiadających pików

falkowych, na wykresach zaznaczono również wartości średnie współczynników (rys. 7). Zmiana wartości współczynnika DC oraz współczynnika AC potwierdza zauważony trend zmian postępujący z uszkodzeniem: wartość współczynnika DC wraz z rozwojem uszkodzenia (którego efektem jest rozproszenie falki w skali, czyli spadek sztywności) wzrasta, natomiast współczynnik AC, zgodnie z założeniem maleje.

Porównanie spadku pierwszej częstotliwości drgań własnych (powiązanej ze spadkiem sztywności) z wartościami średnimi współczynników DC i AC zestawiono w tabeli 3.



Rys. 7. Współczynnik DC oraz AC wraz z wartością średnią

Fig. 7. Dispersion and Asymmetry Coefficient (mean value – line)

Tabela 3. Zmienność pierwszej częstotliwości drgań własnych oraz średnich wartości współczynników wrażliwych na uszkodzenie

Table 3. Changes of the first natural frequency and mean values of the sensitive-damage coefficient

	„Intact”	Stan ‘III’	Stan ‘VI’
1. Pierwsza częstotliwość drgań własnych	4,69 Hz	2,44 Hz	1,46 Hz
2. Współczynnik DC	0,032	0,389	1,132
3. Współczynnik AC	5,607	3,978	2,572

## 6. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono próbę wytypowania współczynników, które poza obrazem współczynników falkowych pozwalałyby stwierdzić, czy w konstrukcji doszło do postępującego uszkodzenia względem znanego stanu: współczynnik pikowy (PC), współczynnik rozproszenia (DC) oraz współczynnik asymetrii (AC).

W celu określenia przydatności wytypowanych współczynników posłużono się modelem żelbetowej ramy portalowej z wykorzystaniem materiałów o nieliniowych związkach konstytutywnych. Współczynnik pikowy (PC) bezpośrednio "śledzi" zmiany wartości częstotliwości drgań własnych konstrukcji i może być wykorzystany z powodzeniem to wykrywania zmian w sztywności konstrukcji. Współczynnik rozproszenia (DC) wyraźnie wskazuje na wzrost wartości wraz z rozwojem uszkodzenia. Porównanie wartości współczynnika przy początkowych stanach uszkodzenia może wskazać chwilę czasową wystąpienia tego uszkodzenia. Współczynnik asymetrii (AC) wraz z rozwojem uszkodzenia wykazuje spadek swojej wartości. Przydatność zastosowania współczynników sprawdzono również dla odpowiedzi konstrukcji badanej eksperymentalnie. Trend zauważony przy analizie prostej ramy potwierdza się w przypadku eksperymentu, jednakże w przypadku współczynnika DC, nie można bezpośrednio określić chwili czasowej wystąpienia uszkodzenia z uwagi na zaszumienie sygnału.

Zastosowanie ciągłej transformaty falkowej może być z powodzeniem wykorzystywane do analizy i detekcji uszkodzeń. Zauważyć można zależność pomiędzy wystąpieniem uszkodzenia w konstrukcji a wartościami współczynników falkowych i wytypowanych współczynników wrażliwych na uszkodzenie. Wykazany w artykule trend zależności potwierdza główny kierunek analiz, które mogą doprowadzić do stworzenia narzędzi wykorzystywanych do automatycznej diagnozy konstrukcji.

## Literatura

- [1] Spanos P.D., Giaralis A., Politis N.P., and Roesset J.M., Numerical treatment of seismic accelerograms and of inelastic seismic structural responses using harmonic wavelets. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(4), 2007, pp. 254-264.
- [2] Wilde K., *Modal diagnostics, of civil engineering structures*, Gdańsk University of Technology Publishers, Gdańsk 2008.
- [3] Bracewell R., *Przekształcenie Fouriera i jego zastosowania*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1965.
- [4] Bałasiewicz J.T., *Falki i aproksymacje*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1965.
- [5] Rucka M., Wilde K., Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates, *Journal of Sound and Vibration*, 297, 2006, pp. 536-550.
- [6] Noh H.Y., Nair K., Lignos D. G., Kiremidjian A.S.Z., Kowalski M., Pospisil S., Use of wavelet-based damage-sensitive features for structural damage diagnosis using strong motion data, *Journal Engineering Structures*, vol. 137(10), 2011, pp. 1215-1228.

- [7] Spanos P. D., Failla G., Wavelets: Theoretical concepts and vibrations related applications, *The Shock and Vibration Digest*, 37(5), 2005, pp. 359-75.
- [8] Morlet J., Arens G., Fourgeau E., Giand D., Wave propagation and sampling theory, *Geophysics* 47(2), 1982, pp. 203-236.
- [9] Balafas K., Kiremidjian A.S., Development and validation of a novel earthquake damage estimation scheme based on the continuous wavelet transform of input and output acceleration measurements, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 44(4), 2014 pp. 1215-1228.
- [10] Nair K.K., Kiremidjian A.S.Z., Damage diagnosis algorithm for wireless structural health monitoring, Earthquake Engineering Center, Department of Civil Engineering, Standord University, California.
- [11] <http://opensees.berkeley.edu/> {dostęp: 10.02.2017 r.}.
- [12] Filippou F.C., Popov E.P, Bertero V.V, Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints, Report EERC 83-19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1994.
- [13] Mohd H., Mohd Y., Nonlinear Analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cycling loads, PhD dissertation, University of California, Berkeley, 1994.
- [14] <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm> {dostęp: 10.02.2017 r.}.
- [15] Zembaty Z., Kowalski M., Pospisil S., Dynamic identification of a reinforced concrete frame in progressive states of damage, *Engineering Structure* 28, 2006, pp. 668-681.

## DAMAGE MONITORING OF A REINFORCED CONCRETE FRAME

### Summary

This paper introduces wavelet based damage-sensitive coefficient extracted from structural response and used to correlate the damage propagation with changes in scalogram of a wavelet coefficient. In order to determine the effect of damage on the structural response, an inelastic numerical model of a reinforced concrete portal frame subjected with increasing seismic excitation has been used. The response of the structure has been processed by Continuous Waveform Transform (using Morlet wavelet as a mother wavelet) representing the analyzed signal in the time-frequency domain. Specific wavelet-based factors (Peak, Dispersion, and Asymmetry Coefficient) helped to determine the moment when the damage occurred in structure (a reduce in stiffness of the structure reflected in the fall of its natural frequency), to confirm the relation between the value of the coefficient and the damage state the response of the experimental reinforced concrete test frame was analyzed. Wavelet analyses of the response records of the *r/c* analyzed frame reveal clear, characteristic changes in the development of the wavelet ridges and peak patterns from the moment the structure starts to accumulate damage. The Peak coefficient directly “follows” the damage by observing the trace of peaks which correspond to natural frequency, it shows a changes in structural stiffness. The Dispersion and Asymmetry Coefficient has clearly shown that with the spread of frequency content the value of coefficient changes.

**Keywords:** nonlinear structure, wavelet analysis, dynamic properties, structural response, wavelet transform

*Przesłano do redakcji: 6.10.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r*



Agnieszka WDOWIAK<sup>1</sup>

## STRUKTURA DREWNA KONSTRUKCYJNEGO

Drewno to priorytetowy surowiec dla przemysłu celulozowego i energetycznego. Źródłem surowcowym są lasy. Powierzchnia lasów w Polsce, z roku na rok, nieustannie wzrasta. Wzrost lesistości od roku 1945 wynosi 8,4%. Przyrost ten jest wynikiem zalesiania gruntów użytkowanych przez rolnictwo i nieużytków [1].

W monografii przedstawiono budowę mikroskopową i makroskopową drewna sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L., pochodzącej z czterech wybranych krain przyrodniczo-leśnych Polski: Kraina A - Mazowiecko – Podlaska Kraina Przyrodniczo – Leśna (Nadleśnictwo Garwolin), Kraina B - Małopolska Kraina Przyrodniczo – Leśna (Nadleśnictwo Przedbórz), Kraina C - Śląska Kraina Przyrodniczo – Leśna (Nadleśnictwo Kędzierzyn Koźle), Kraina D - Karpacka Kraina Przyrodniczo – Leśna (Nadleśnictwo Piwniczna). Ukazano strukturę mikroskopową jodły pospolitej *Abies alba* Mill., modrzewia europejskiego *Larix decidua* Mill. pochodzącego z zabytkowego obiektu wybudowanego w 1860 r., sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. poddanej 5 - letnim wpływom atmosferycznym oraz degradacji biologicznej.

Określono przyrosty roczne, biel i twardziel, pęcherze i wycieki żywiczne oraz promienie tykodrzewne. Zaprezentowano właściwości rozpoznawcze wybranych rodzajów drewna iglastego, w szczególności zabarwienie twardzieli, szerokość przyrostów rocznych, udział bieli i twardzieli, obecność przewodów żywicznych, przejście z drewna wczesnego do późnego czy strukturę sęka.

Dodatkowo scharakteryzowano takie gatunki drzew, jak sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L., świerk pospolity *Picea abies* Karst., modrzew europejski *Larix decidua* Mill., jodła pospolita *Abies alba* Mill., dagleżja zielona *Pseudotsuga menziesii* Franco [1-2].

**Słowa kluczowe:** drewno, struktura mikroskopowa, struktura makroskopowa, przyrosty roczne, biel i twardziel, pęcherze i wycieki żywiczne, promienie tykodrzewne, sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L., świerk pospolity *Picea abies* Karst., modrzew europejski *Larix decidua* Mill., jodła pospolita *Abies alba* Mill., dagleżja zielona *Pseudotsuga menziesii* Franco

### 1. Wprowadzenie

Drewno jest nieustannie używane i ma tysiące zastosowań praktycznych, pomimo swoich wad jak i zalet. Postać proekologiczna, recyklingowa oraz estetyczna, spowodowana jest satysfakcjonującą charakterystyką fizykomechaniczną tego surowca organicznego. Pomyślne właściwości mechaniczne, cieplne, aku-

---

<sup>1</sup> Agnieszka Wdowiak, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej, Zakład Remontów i Utrzymania Budowli, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, tel. 41 34 24 444, 34 24 445, awdowiak@tu.kielce.pl

styczne są podstawą wznoszenia nowoczesnego budownictwa szkieletowego. Szeroko stosowane drewno we wnętrzach mieszkalnych jest wynikiem podnoszenia poziomu wyposażenia, komfortu jak również zdrowotności [1].

Drewno jest materiałem, który ukazuje, w odniesieniu do rodzaju, wielką nierównomierność swoich własności. To materiał anizotropowy – różnicowane cechy w różnych kierunkach i niejednorodny – wady [3-6].

Budynki drewniane były realizowane w różnych latach, nie mniej jednak pewna ich część pochodzi nawet z końca XIX w. Tworzą one część zabudowy wsi, małych miasteczek i peryferii większych miast. Zazwyczaj to budynki parterowe bądź jednopiętrowe, czasem dwupiętrowe. Większa ich część, nie jest podpiwniczona a mniejsza – częściowo podpiwniczona. Wśród budynków mieszkalnych o konstrukcji drewnianej, w większości budowano na Podkarpaciu. Realizowano je w stylu zakopiańskim. Inne obszary odznaczały się przede wszystkim budynkami tymczasowymi, niekiedy rolniczymi, obiektami rekreacyjnymi, altankami w ogródkach działkowych. Współcześnie mieszkalne budynki drewniane wykonywane są zazwyczaj w formie lekkiego szkieletu (system kanadyjski). Nadal buduje się je w konstrukcji odnoszącej się do tradycyjnej – z bali [4, 6].

W ostatnim okresie rośnie popyt na tarcicę konstrukcyjną. Ich rola w budownictwie jest coraz to większa, w wyniku nowoczesnej technologii zabezpieczania oraz produkcji. W naszym kraju tarcica konstrukcyjna jest wykorzystywana do produkcji tradycyjnych i prefabrykowanych więźb dachowych a także do wznoszenia ścian domów o konstrukcji szkieletowej. Sukcesywnie rośnie również produkcja elementów konstrukcyjnych klejonych warstwowo z tarcicy [7-8].

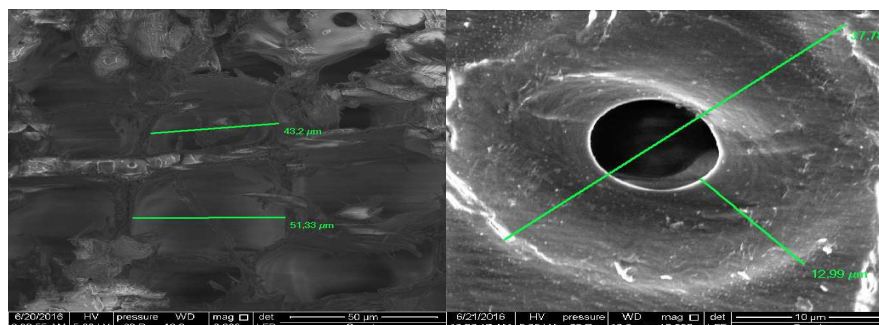
## 2. Struktura drewna

### 2.1. Struktura mikroskopowa drewna

Do budowy mikroskopowej drewna przyporządkowuje się elementy budowy, dostrzegalne przy użyciu mikroskopu optycznego. Innymi słowy, podmioty o zakresie mniejszym niż 0,1 mm i większym niż połowa rozciągłości fali świetlnej. Podmiotami są komórki formujące strukturę drewna. Dlatego też, inna jest budowa drewna iglastego, a inna liściastego – budują ją komórki różnego typu [1, 9].

Drewno zestawione jest z komórek. Struktura komórek roślinnych uzależniona jest od ich funkcji, warunków otoczenia (wzrostu) oraz członkostwa rośliny w danej grupie systematycznej. W drewnie wyodrębnia się dużą ilość grup komórek [3].

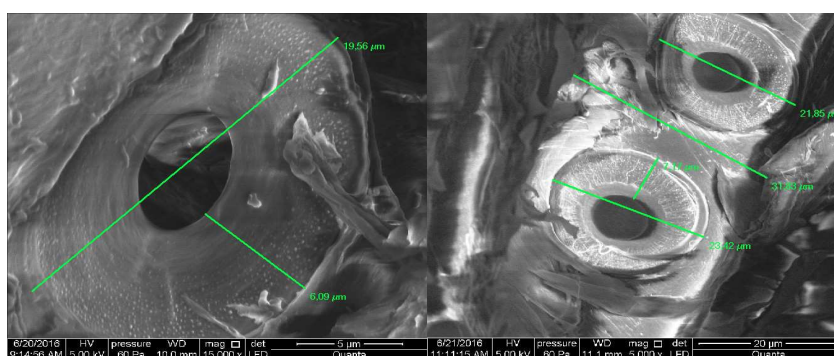
Drewno drzew iglastych posiada stosunkowo prostą budowę. Badania mikroskopowe przeprowadzono w laboratorium Katedry Wytrzymałości Materiałów, Konstrukcji Betonowych i Mostowych Politechniki Świętokrzyskiej z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Schematy budowy warstwowej ściany komórkowej przedstawiają rys. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8. Uzyskane obserwacje budowy mikroskopowej drewna świeżego sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. i jodły pospolitej *Abies alba* Mill. oraz drewna zabytkowego modrzewia europejskiego *Larix decidua* Mill., uściślają dotychczasowe dane dotyczące struktury.



Rys. 1. Budowa mikroskopowa sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. pochodzącej z Nadleśnictwa Garwolin

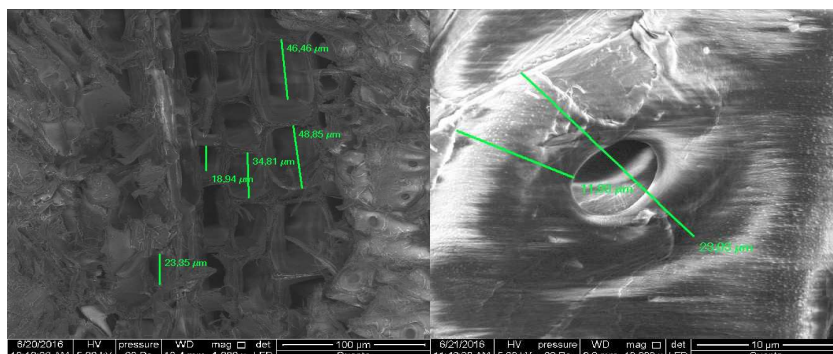
Fig. 1. Microscopic structure of pine *Pinus sylvestris* L. from Garwolin Forest Inspectorate

Zasadniczym budulcem drewna (ksylemu) są cewki, formujące przewodnią część drewna iglastego. Pełnią funkcję wzmocnienia i przewodzenia wody. Cewki u pierwotnych i lądowych roślin, posiadają pierścieniowe lub spiralne zgrubienia, znajdujące się na wewnętrznej powierzchni ścian. Definiują funkcję wzmocnienia osiowych narządów rośliny. Cewki są to wydłużone, wchodzące na siebie, komórki martwe, o zdrewniałych ścianach, z częstymi jamkami lejkowatymi, jakimi woda dobiega w kierunku podłużnym i poprzecznym. Promienie łykdrzewne ciągną się prostopadle do cewek i są wytworzone głównie z komórek miękiszowych. U niektórych gatunków iglastych występują również cewki poziome. U sosny, świerka i modrzewia, dodatkowo są rzadkie komórki miękiszowe, budujące miękisz drzewny, pojawiający się jedynie w sąsiedztwie pionowych kanałów żywicznych. Kanały żywiczne rozchodzą się równoległe do osi pędu i zbiegają się w układ sieci, biegnący promieniście, w zespoleniu z poziomymi przewodami w złożonych promieniach łykdrzewnych [1-2].



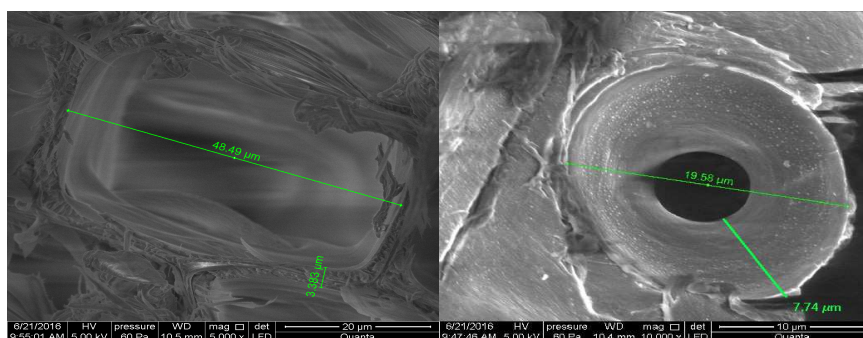
Rys. 2. Budowa mikroskopowa sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. pochodzącej z Nadleśnictwa Przedbórz

Fig. 2. Microscopic structure of pine *Pinus sylvestris* L. from Przedbórz Forest Inspectorate



Rys. 3. Budowa mikroskopowa sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. pochodzącej z Nadleśnictwa Kędzierzyn Koźle

Fig. 3. Microscopic structure of pine *Pinus sylvestris* L. from Kędzierzyn Koźle Forest Inspectorate



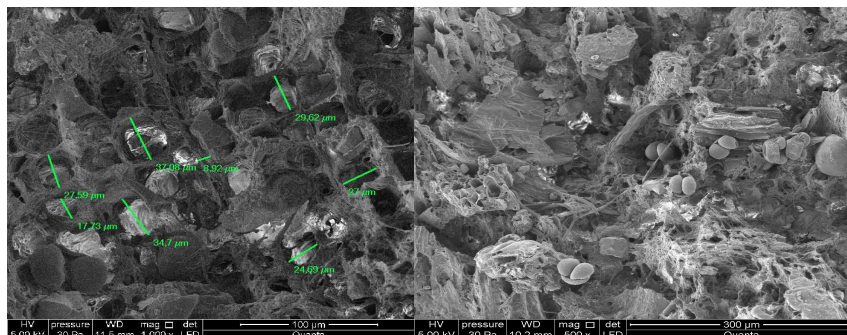
Rys. 4. Budowa mikroskopowa sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. pochodzącej z Nadleśnictwa Piwniczna

Fig. 4. Microscopic structure of pine *Pinus sylvestris* L. from Piwniczna Forest Inspectorate

Cewki w dwóch kierunkach, przewodzenia lub wzmocnienia, ukierunkowały się etapowo. Usprawnianie przewodzenia kosztem sprawności wzmocnienia, przyczyniło się do utworzenia naczyń. Pojawiające się u niemalże wszystkich roślin okrytonasiennych (drzew liściastych). Formy pierwotniejsze posiadają człony naczyń dłuższe i węższe a formy bardziej rozwinięte - krótsze i szersze [1-2].







Rys. 8. Budowa mikroskopowa sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. - degradacja biologiczna

Fig. 8. Microscopic structure of pine *Pinus sylvestris* L. - biological degradation

Polepszenie funkcji wzmocnienia kosztem zdolności przewodzenia, podwyższał grubość ścian a obniżał liczbę i rozmiar jamek. Doprowadziło to do zaciątku elementów o jamkach szczelinowych lub skośnych. Powiększanie się ścian i minimalizowanie jamek, spowodowało powstanie włókien. Drewno liściaste zawiera oprócz promieni rdzeniowych i miękiszu drzewnego, naczynia i włókna drzewne. Czasem naczynia o stosunkowo dużej średnicy, formują pasma zwarte, układające się od korzeni do końcowych rozgałęzień pędów. W słoju rocznym, w zależności od ułożenia naczyń, wyodrębnia się strukturę pierścieniowonacyniową, rozpierzchłonacyniową a także półpierścieniowonacyniową. Naczynia o dużym świetle, u gatunków drewna pierścieniowonacyniowego (m.in. dąb, jesion, wiąz, grochodrzew, morwa, teak, przeorzech), klasyfikują się tylko w drewnie wczesnym. Generują zwarty pierścień na przekroju poprzecznym. Drewno późne ukształtowane jest głównie z cewek włóknistych i włókien drzewnych. U gatunków takich jak klon, brzoza, grab, topola, lipa, olcha oraz większość egzotycznych, naczynia podobne średnicowo, rozprowadzone są w całym przyroście rocznym. W kraju, naczynia mają niewielką średnicę, tj. poniżej 0,1 mm i nie są widoczne gołym okiem. Gatunki egzotyczne mają duże naczynia, dobrze widoczne na wszystkich przekrojach drewna, a przyrosty roczne wielokrotnie nie są rozróżnialne. Przykładowo czereśnia, wiśnia, śliwa jako gatunki półpierścieniowo naczyniowe, charakteryzują się większą średnicą naczyń i mają ich więcej w drewnie wczesnym niż w drewnie późnym. W budowie mikroskopowej bardzo widoczna jest anizotropia drewna. Komórki w znacznej części, rozmieszczone są równoległe do osi podłużnej pnia, niektóre natomiast mają kształt bardzo wydłużonych wrzecion. Stosunek długości komórki drzewnej do jej wymiaru przekroju poprzecznego, przekracza niejednokrotnie liczbę stosunkową 100. Zatem drewno ma odmienne właściwości w różnych kierunkach anatomicznych, jest anizotropowe [1-2]. Charakterystyczne wielkości komórek obejmuje tabela 1.

Tabela 1. Wielkości komórek strukturalnych drewna (opracowanie własne na podstawie [3])

Table 1. Sizes of timber cells (table compiled by the author on the basis of [3])

L.p.	OKREŚLENIE	DŁUGOŚĆ [mm]	ŚREDNICA [mm]
1.	CEWKI	1-10	0,02-0,04
2.	WŁÓKNA	0,7-1,9	0,01-0,05
3.	NACZYNIA	100 i więcej	0,1-0,6 – drewno wczesne 0,03-0,09 – drewno późne

## 2.2. Struktura makroskopowa drewna

Drewno to surowiec o pochodzeniu organicznym. Cechy i właściwości odzwierciedlają funkcje, które pełnią w żywym organizmie roślinnym. Wyodrębnia się trzy zasadnicze formy budowy strukturalnej: drewno iglaste, drewno liściaste rozpierzchłonaczyniowe, drewno liściaste pierścieniowonaczyniowe [3].

Cechy makroskopowe drewna są rozróżnialne nieuzbrojonym okiem, o wielkości ponad 0,1 mm. Są to przyrosty roczne, strefy drewna późnego i wczesnego, obecność twardzieli, błyszczu, dużych naczyń, wycieków żywicznych, lub rozmieszczenie i kształt sęków itd. Cechy te, najczęściej bada się na trzech podstawowych przekrojach drewna (dwóch wzdłużnych: stycznym i promieniowym oraz jednym poprzecznym). Nie należy mieszać przekrojów anatomicznych z trzema kierunkami anatomicznymi: stycznym, promieniowym i wzdłuż włókien [1, 6, 9-10].

Corocznie drzewo produkuje warstwę drewna zauważalną na przekroju poprzecznym pnia w kształcie pierścienia (słój roczny) [3]. Przyrost drzew na wysokość, utrzymuje się do wieku określonego dla danego gatunku. Aczkolwiek przyrost grubości pnia dochowuje się tak długo, jak długo żyje drzewo. Biorąc pod uwagę szybkość wzrostu drzewa, wyróżnia się trzy grupy: szybko, średnio i wolno rosnące. Szybko rosnące drzewa charakteryzują się szerokimi przyrostami rocznymi, w szczególności w młodym wieku – do kilkunastu lat. Po pewnym czasie wzrost drzewa maleje, słoje roczne są węższe. Grupa tych drzew żyje krótko i nie osiąga dużych rozmiarów. Natomiast drzewa średnio i wolno rosnące uzyskują istotne wysokości przy długotrwałym życiu [11].

### 2.2.1. Przyrosty roczne

Drewno to tkanka złożona, która występuje u roślin naczyniowych. Płaszcz kambium w pniu drzewa - wieloletniej zdrewniałej łodydze, co roku wytrąca do wewnątrz, nową warstwę drewna w postaci pierścienia (słój roczny). W przyroście rocznym rozróżnia się warstwę drewna wczesnego – drewno jaśniejsze, o mniejszej gęstości i twardości, porowate, wydzielone na wiosnę, pełniące funkcję przewodzącą oraz warstwę drewna późnego – drewno zwarte o ciemniejszym zabarwieniu, pełniące funkcję wzmacniającą. Największy udział dREW-

na wczesnego uwidaczniają słoje roczne w centralnej części pnia. Ku obwodowi drewna, wzrasta udział drewna późnego. W warunkach wysokogórskich i dalekiej północy, wąskosłoiste drewno świerka i sosny zawiera po jednej warstwie komórek. Odmienna budowa drewna wczesnego i późnego spowodowała bardzo dobrą czytelność przyrostów rocznych w drewnie iglastym jak i pierścieniowonaczyniowym. Słabo widoczne są przyrosty roczne w drewnie rozpierzchłona-czyniowym, a niewidoczne w roślinach jednoliściennych i tropikalnych [1-2]. Zróżnicowana struktura znajdująca się w drewnie wczesnym i późnym, opiera się na większej średnicy komórek w strefie wczesnej i znacznym spłaszczeniu i zgrubieniu ścian komórkowych w strefie późnej. U drzew iglastych, razem ze wzrostem szerokości słoju, wzrasta poziom cienkościennego drewna wczesnego, przy czym szerokość drewna późnego stosunkowo nie zmienia się. Toteż wąskosłoiste drewno jest lżejsze i o mniejszej wytrzymałości, w stosunku do drewna wąskosłoistego, gdzie stosunek procentowy drewna późnego do wczesnego jest większy. U gatunków pierścieniowonaczyniowych, zwiększenie szerokości sło-jów rocznych, powoduje spadek udziału naczyń drewna wczesnego i wzrost udziału włókien drewna późnego, jak również zwiększenie wytrzymałości. Drewno szerokosłoiste jest wytrzymalsze od drewna wąskosłoistego. Gatunki rozpierzchłona-czyniowe charakteryzują się brakiem rozbieżności między drem-nem późnym a wczesnym. Nie ma zależności pomiędzy szerokością słoju a udziałem drewna późnego [3]. Przyrost drewna wczesnego odbywa się w okre-sie wiosennym. W tym okresie, najważniejszym zadaniem jest przewodzenie wody i rozpuszczenie w niej soli mineralnych. Zatem drewno wczesne składa się z cienkościennych elementów o dużym świetle. W późniejszym okresie wegeta-cyjnym, powstaje drewno późne, gdzie główną rolę pełni funkcja mechaniczna. Drewno późne złożone jest z grubościennych elementów, a światło naczyń i ce-wek jest niewielkie. Szerokość słoju może być określana za wskaźnik tech-nicznej właściwości drewna. U drzew iglastych, wąskosłoistość jest wskaźni-kiem wyższej przydatności technicznej od szerokosłoistości. Maksimum cech wytrzymałościowych jest powiązany ze średnią szerokością słoju równą 2 mm. Drewno pierścieniowonaczyniowe o wysokiej wytrzymałości jest określone średnią szerokością słoju rocznych równą dla dębu – 3 mm. Drewno szeroko-słoiste, w przypadku jesionu, zawiera się w przedziale 6 mm. Udział drewna późnego wyznacza się na podstawie pomiarów liniowych. Zazwyczaj szacuje się średnią szerokość słoju. Pomiary wykonuje się na przekroju poprzecznym pnia, wzdłuż średniego promienia lub na przekroju poprzecznym próbki, celem określenia różnic pomiędzy badaną cechą techniczną i udziałem drewna późne-go. Krążki albo próbki należy ciąć prostopadle do osi. Powierzchnię przekroju wygładza się a następnie określa się linię pomiaru, o przebiegu prostopadłym do słoju. Według tej linii, wykonuje się nacięcia w drewnie ostrym narzędziem, tak aby nasilić wyrazistość słoju [2].



### 2.2.2. Biel i twardziel

Twardziel wydzielają niektóre gatunki drzew. Umiejscowione najbliższej rdzenia, najstarsze słoje roczne, przemieniają skład chemiczny. Są mechanicznie izolowane od przyobwodowych warstw drewna za pomocą zamkniętych jamek albo wciskowanie. Twardziel ma ciemniejszą barwę w zestawieniu z pozostałym drewnem. Dlatego też bardzo łatwo jest rozróżnić twardziel od bielu. Twardziel spełnia funkcję wzmacniającą pień. Natomiast biel utwardza pień oraz przewodzi wodę i gromadzi substancję odżywcze. Wyznacza się trzy grupy drzew, w zależności od bytowania twardzieli i jej zabarwienia: drzewa o twardzieli zabarwionej (w szczególności sosna, modrzew, daglezja), drzewa o twardzieli niezabarwionej (wśród nich świerk, jodła) oraz drzewa beztwardzielowe - nie wytwarzające twardzieli. Może powstać tzw. fałszywa twardziel (rys. 9), jako objaw chorobowy [1-2].



Rys. 9. Przykład fałszywej twardzieli

Fig. 9. Examples of false heartwood

### 2.2.3. Pęcherze i wycieki żywiczne

W przecięciu kanałów żywicznych dostrzegalne są wycieki żywicy, zaobserwowane u niektórych gatunków iglastych, takich jak sosna, świerk, modrzew, daglezja. Mają kształt drobnych plamek na przekroju poprzecznym a na przekrojach wzdłużnych występują w postaci kresiek (smug). Zależnie od kąta padania światła lub zabrudzenia, smugi te są ciemniejsze lub jaśniejsze od otaczającego drewna. Sprawnie jest określić pęcherze żywiczne. Jeszcze za życia drzew, w rozstępach tkanki drzewnej, gromadzi się żywica. Pęcherze charakteryzują się wydłużonym kształtem, jak również ułożone są równoległe do osi pnia. Ich długość wynosi zazwyczaj kilka centymetrów. Gatunki iglaste zawierające żywicę, produkują przeżywienia, występujące na nadpsutych sękach. Przekrój styczny obejmuje wydłużone soczewki, ciemniejsze od otaczającego drewna [1-2].

#### 2.2.4. Promienie łykodrzewne

Promieniami łykodrzewnymi nazywamy poziome elementy struktury drewna, prowadzące promieniowo, od rdzenia ku obwodzie pnia. Gatunki iglaste mają promienie łykodrzewne drobne i słabo widoczne, rozpoznawalne gołym okiem tylko na przekroju promieniowym. Gatunki liściaste, wśród nich dąb, buk, klon, platan, mają promienie łykodrzewne duże. Umożliwia ich określenie makroskopowo, na wszystkich trzech przekrojach. Na przekroju promieniowym tworzą błyszcz [1-2].

W odniesieniu do składu chemicznego, drewno jest niejednorodne. Ich skład jest uzależniony od gatunku drewna. W ogólności stwierdza się, że drewno ma około 50% celulozy, 20% hemiceluloz, 25% ligniny, 5% pozostałych składników [3].

### 3. Przegląd typowych gatunków i rodzajów drewna iglastego

W Polsce praktycznie tarcica konstrukcyjna jest wydobywana tylko z drewna dwóch gatunków iglastych: sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. i świerka pospolitego *Picea abies* L. Wśród państw europejskich, jedynie Niemcy i kraje skandynawskie w odniesieniu z Polską, zajmują większą powierzchnię lasów iglastych. Dlatego też istotna pozycja polskiej tarcicy sosnowej i świerkowej, nie tylko na rynku krajowym ale i zagranicznym. Według normy PN-D-94021:2013-10, oprócz sosny i świerka, wyróżnić można jeszcze modrzew, jodłę i daglezję jako źródło tarcicy konstrukcyjnej [12]. Z uwagi na ich niewielką ilość, mają znaczenie drugorzędne [1].

#### 3.1. Sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L.

Gatunek ten generuje lite drzewostany. Jest szeroko rozprzestrzeniony w całej Europie, występujący w części północnej i północno-wschodniej. Polska pozostaje w zasięgu tego gatunku, prócz terenów wysokogórskich. Z pominięciem limby i kosodrzewiny, sosna pospolita to jeden z trzech rodzimych gatunków. W Polsce można napotkać 12 innych gatunków sosen, dla przykładu sosna wejmutka, sosna czarna, sosna Banksa, sosna smołowa. Ich wymiar nie jest dość duży. Sosna pospolita (rys. 10), ma dużą przydatność dostosowania się do warunków środowiska. Mimo to, należy do gatunków mało zmiennych. Typowa sosna pospolita osiąga do 30-40 m. W młodości, korona stożkowa z gałęziami wyrastającymi w okółkach. W późniejszym etapie rozwoju, zmienia się w formę parasolowatą. Biorąc pod uwagę drzewostany w Polsce, sosna zajmuje pierwsze miejsce. Ma największy zasięg wśród wszystkich roślin uprawianych w rolnictwie, ogrodnictwie, leśnictwie. W żadnym kraju, jak w Polsce, jeden gatunek nie zajmuje procentowo tak czołowego położenia w składzie gatunkowym lasów. Sosna to gatunek twardzielowy. Po wykarczowaniu drzewa lub przetarciu kłody,

twardziel nie różni się od bielu. Po pewnym czasie, skokowo ciemnieje, przyjmując barwę brunatnoczerwonawą. Biel ma kolor żółtobiały, jest szeroki, ogarnia ponad 25 przyrostów rocznych. Sęki są w okółkach, koloru ciemniejszego od otaczającego drewna. Występują tam też przeżywiczienia. Wyraźne słoje roczne, szerokość uwarunkowana warunkami wzrostu drzewa. Drewno wczesne jest jaśniejsze od drewna późnego. W obszarze przyrostu rocznego, przejście z drewna wczesnego do późnego jest dość ostre. Tarcica charakteryzuje się żywicznym zapachem, co jest spowodowane licznymi wyciekami żywicznymi drzewa. Promienie tykoderwne drobne, mało wyraźne, tylko na idealnie promieniowym przekroju. Podstawowymi wadami drewna są sinizny i przeżywiczienia. Drewno jest lekkie, miękkie i łatwo łupliwe [1, 11].



Rys. 10. Sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L. pochodząca z Nadleśnictwa Przedbórz

Fig. 10. Pine *Pinus sylvestris* L. from Przedbórz Forest Inspectorate

### 3.2. Świerk pospolity *Picea abies* Karst.

To wyłączny rodzimy gatunek świerka i jeden z siedmiu rodzimych gatunków. Formuje lite drzewostany na dużych obszarach. Zakres świerka pospolitego obejmuje obszary: alpejsko-bałkański, sudecko-karpacki, bałtycko-północno-rosyjski. Dwa pierwsze obszary stanowi drzewo wysokogórskie, natomiast trzeci – nizinny. Przez Polskę ciągnie się pas bezświerkowy, rozdzielający świerk górski – świerk z obszaru sudecko-karpackiego, od świerka nizinnego – obszar bałtycko-północno-rosyjski. Różnorodne warunki, duży rozmiar, doprowadziły do powstania licznych odmian, ekotypów, form świerka. Szczegółowo nie są one nakreślone, na skutek zjawisku krzyżowego zapylenia drzew. Dlatego trudno natrafić na indywiduum, typowe do porównań. Powszechny świerk pospolity ma prosty pień, o wysokości do 50 m. Korona jest stożkowata, gałęzie odrastają w okółkach. U młodych gatunków wykształcają się pod kątem ostrym do pobocznicy pnia i brną ku górze, natomiast u starszych poziomo. W piętrze regla górnego, gatunki te formują górskie bory świerkowe. Na obszarach nizinnych

stanowią zespoły leśne. Pojawiają się też inne, rzadkie formy pokrojowe świerka, m.in. forma szczudłowa, sztandarowa, kolumnowa, krzaczasta. Prócz świerka pospolitego, w Europie można spotkać jeszcze trzy gatunki: świerk syberyjski *Picea obovata*, świerk kaukaski *Picea orientalis* Link., świerk serbski *Picea omorica* Purk. Biorąc pod uwagę obszar drzewostanów, świerk lokuje się w Polsce na drugim miejscu. Świerk ma twardziel niezabarwioną. W wyniku przetarcia, twardziel jest dostrzegalna poprzez różnicę wilgotności. Biel wilgotny jest ciemniejszy. Po wysuszeniu, różnica barwna zanika. Biel jest dostatecznie szeroka. Drewno świerka koloru białego, niekiedy jasnożółtego i lekko błyszczącego. Rozmieszczone sęki są w równomiernych okółkach, twardsze i ciemniejsze od otaczającego drewna. Podczas suszenia, nieraz obłuzowują się i wypadają. Od razu, po przetarciu lub przestruganiu, występuje lekki żywiczny zapach na wyciekach żywicznych. Wyraziste słoje roczne. Drewno wczesne, szerokie i jaśniejsze, rozróżnia się od ciemniejszego drewna późnego. W przyroście rocznym, przejście z drewna wczesnego do późnego jest łagodne. Promienie rdzeniowe mało zauważalne na przekroju promieniowym. Standardowymi wadami drewna świerkowego są pęcherze żywiczne i twardzica. Drewno lekkie, miękkie, łatwo łupliwe [1, 11].

### **3.3. Modrzew europejski *Larix decidua* Mill.**

Drzewo iglaste o opadających igłach na zimę i wysokości do 40 m. Ma smukłą i stożkową koronę, która zmienia się w szeroką, ze spłaszczonym wierzchołkiem. Rosnące gałęzie są niesymetryczne, pod kątem prostym do osi pnia. W pierwszym okresie, modrzew znajdował się tylko w Alpach, we wschodnich Sudetach, w Tatrach i na Niżu Polskim. W wyniku upraw leśnych, aktualnie jest rozprzestrzeniony w całej Europie. Posiada małe wymagania pokarmowe, co umożliwia jego wzrost na wielu siedliskach. Gatunek twardzielowy. Biel wąska, żółtawa, odróżnia się od twardzieli barwy bladobrazowej lub czerwobrazowej. Sęki ciemnobrunatne, rozstawione niejednolicie. Widnieją sporadyczne wycieki żywiczne o nikłym żywicznym zapachu. Czytelne słoje, na skutek różnicy w zwężłości i barwie drewna wczesnego oraz późnego. Przejście jasnego drewna wczesnego w drewno późne jest dość szorstkie. Słabo przejrzyste promienie rdzeniowe na przekroju promieniowym. Wadami tego gatunku jest silna zbieżność oraz pęcherze żywiczne. Modrzew jest twardy, łatwo łupliwy i średnio ciężki [1, 11].

### **3.4. Jodła pospolita *Abies alba* Mill.**

Pojawiają się w górach środkowej i południowej Europy, w lasach regla górnego. Jodła charakteryzuje się prostym pniem i wysokością do 50 m. Pierwotnie stożkowa korona, przeradza się w kolumnę ze spłaszczonym wierzchołkiem. Niesystematyczne gałęzie są zwrócone ukośnie ku górze. Gatunek twardzieli niezabarwionej. Drewno koloru białego, okresami z odcieniem różowym

lub żółtym. Tożsame z drewnem świerkowym lecz bardziej matowe. W drewnie jodły nie istnieją wycieki żywiczne i pęcherze. Nierównomierne sęki są jasne. Tarcica świeża ma zapach podobny do zjełczałego masła, potem jest bezwonna. Dodatkowo zauważalne słoje roczne. Przejście drewna wczesnego w późne jest łagodne. Promienie łykodrzewne widoczne są tylko na idealnie promieniowym przekroju. Charakterystyczne wady to twardzica i pęknięcia okrężne. Jodła jest lekka, miękka i bardzo łatwo łupliwa [1, 11].

### **3.5. Daglezja zielona *Pseudotsuga menziesii* Franco.**

Gatunek północnoamerykański. Daglezja początkowo występowała w zachodniej części Ameryki Północnej. W wieku XVIII ściągnięto ją do Europy. W kraju zasadzono ją w okresie międzywojennym, co spowodowało powstanie drzewostanów w wieku rębny. Wiecznie zielone drzewo iglaste, osiagające nawet 100 m a w Europie do 50 m. Najpierw stożkowata korona, następnie spłaszczona przez poziomo odstające konary. Gałęzie rosną w okółkach, poziomo do osi pnia. Gatunek twardej. Biel jest szeroka i żółtawobiała. Tymczasem twardej jasnożółtobrazowa, niekiedy z zielonkawym odcieniem. Gatunek drewna szerokosłojowego o znacznym udziale drewna późnego. Wyraziste słoje roczne. Bardzo ostre przejście od drewna późnego do wczesnego. Występują niewielkie i liczne wycieki żywiczne w postaci drobnych kropek na przekroju poprzecznym i kreskach na przekroju wzdłużnym. Małe promienie rdzeniowe, dostrzegalne tylko na przekroju promieniowym. Sęki są ciemniejsze od otaczającego drewna. Podstawowymi wadami są pęcherze żywiczne oraz pęknięcia rdzeniowe. Drewno daglezji jest lekkie, całkiem twarde, łatwo łupliwe [1, 11].

## **4. Makroskopowe oznaczenie drewna iglastego**

Przy diagnozowaniu drewna poszczególnych rodzajów i gatunków, powinno się brać wiele cech składających się na jego rysunek oraz związanych z jego właściwościami fizyko-chemicznymi. Przede wszystkim pozostaje wskazać typ struktury drewna: iglaste, liściaste pierścieniowonaczyniowe, liściaste rozpierzchłona-czyniowe ze strefy umiarkowanej lub tropikalnej (drewno egzotyczne) [1, 11].

### **Cechy odróżniające drewno iglaste od pozostałych typów drewna:**

- brak naczyń, czyli niewidzialne są znikome otwory na przekroju poprzecznym oraz nieobecne drobne rowki na przekrojach wzdłużnych, identycznie jak u drewna liściastego pierścieniowonaczyniowego lub rozpierzchłona-czyniowego ze strefy tropikalnej;
- wydatnie dostrzegalne zarysowane przyrosty roczne (słoje), w drewnie liściastym rozpierzchłona-czyniowym są niemalże niezauważalne.

Po określeniu typu drewna iglastego, wyznacza się rodzaj drewna. W tabeli 2 scharakteryzowano cechy wyróżniające sosnę, świerk, modrzew, jodłę, daglezję. Do tych cech należy m.in.: zabarwienie twardej, szerokość bielu, wycieki

Tabela 2. Podstawowe właściwości badawcze rodzajów drewna iglastego (opracowanie własne na podstawie [1])

Table 2. Basic distinctive properties of selected coniferous wood species (table compiled by the author on the basis of [1])

Lp.	Rodzaj drewna iglastego	Zabarwienie twardej	Szerokość przyrostów rocznych	Udział bielu i twardej	Obecność przewodów żywicznych	Przejście z drewna wczesnego do późnego	Występowanie i przekrój sęka
1.	<b>ŚWIERK</b> <i>Picea sp.</i>	niezabarwiona	różna	-	śladowe, ledwo zauważalne	delikatne	w okółkach, przekrój okrągły na przekroju stycznym
2.	<b>JODŁA</b> <i>Abies sp.</i>	niezabarwiona	różna	-	brak	delikatne	głównie niesymetryczne, rzut zwykle eliptyczny na przekroju stycznym
3.	<b>DAGLEZJ A</b> <i>Pseudotsuga sp.</i>	intensywność niska	szerokościasta (4 mm)	szerokobielaste (1/5)	znikome, nikle dostrzegalne	zbyt szorstkie, duża część drewna późnego	w okółkach, plan zwykle okrągły na przekroju stycznym
4.	<b>SOSNA</b> <i>Pinus sp.</i>	intensywność średnia	różna	szerokobielaste (1/3)	drobne, niekiedy liczne	zbyt szorstkie	w okółkach, kształt eliptyczny na przekroju stycznym
5.	<b>MODRZE W</b> <i>Larix sp.</i>	intensywność wysoka	różna	wąskobielaste (1/10)	nieznaczne, nieraz wielokrotne i dobrze widzialne	zbyt szorstkie	nieregularne, układ okrągły na przekroju stycznym

żywiczne, szerokość przyrostów rocznych, udział drewna późnego, występowanie i układ sęków. Do zdiagnozowania makroskopowego drewna mogą pomóc jego właściwości techniczne. Przeważnie te, które możemy wyznaczyć bez użycia aparatury specjalistycznej (gęstość czy twardość) [1, 11].

#### Makroskopowa analiza rozpoznawcza drewna iglastego:

- jodła - drewno białe, odcień brązoworóżowy, przejrzyste słoje roczne – wąskie w strefie przyrdzeniowej, delikatne przejście z drewna wczesnego do późnego, niesymetryczne sęki, drewno nieciężkie, brak przewodów żywicznych, niezabarwiona twardej;
- świerk – żółtawobiałe, słoje roczne z wąską strefą drewna późnego, delikatne przejście z drewna wczesnego do późnego, sęki występujące w okółkach i lekko ciemniejsze od otaczającego drewna, twardej niezabarwiona, w drewnie późnym – przewody żywiczne jasne, rzadkie punkty, wielokrotne pęcherze żywiczne;
- modrzew – ciemnoczerwonoróżowa twardej, żółtawa i wąska biel, ciemne drewno późne, nagłe przejście od drewna wczesnego do późnego, sęki – częste, ciemnobrunatne i nieregularne, drewno średnio ciężkie, zabarwiona twardej, w drewnie późnym – przewody żywiczne jasne, rzadkie, niewidoczne punkty;

- daglezja – różowobrzozowa twardziel, szeroka i brązowa biel, wyraźne przejście od drewna wczesnego do późnego, sęki – liczne i regularne, drewno średnio ciężkie, zabarwiona twardziel, w drewnie późnym – przewody żywiczne jasne, rzadkie, niewidoczne punkty;
- sosna – czerwobrzozowa twardziel, żółtawobiała i szeroka biel; wyraźne przejście od drewna wczesnego do późnego, sęki – ciemniejsze i regularne, przeżywienia przysęcne o przekroju soczewek, drewno średnio ciężkie, twardziel zabarwiona, w drewnie późnym – przewody żywiczne jasne, częste i widoczne punkty [1].

## 5. Podsumowanie

Drzewa są okazałymi, długowiecznymi przedstawicielami roślin naczyniowych. Przeprowadzone rozważania literaturowe wyczerpująco scharakteryzowały najważniejsze informacje dotyczące struktury drewna konstrukcyjnego. W efekcie przytoczonego zestawienia, uzyskano przejrzystą analizę budowy mikroskopowej i makroskopowej drewna. Co więcej, zilustrowano budowę mikroskopową drewna konstrukcyjnego z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Rozpatrywane drewno sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. oraz modrzewia europejskiego *Larix decidua* Mill. posiada cewki o prostokątnym kształcie nakreślone na przekroju poprzecznym. Średnica promieniowa cewek drewna wczesnego sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L., jodły pospolitej *Abies alba* Mill. oraz drewna zabytkowego modrzewia europejskiego *Larix decidua* Mill. jest około 2 razy większa od cewek drewna późnego.

## Literatura

- [1] Kozakiewicz P., Krzosek S.: Inżynieria materiałów drzewnych, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2013.
- [2] Krzysik F.: Nauka o drewnie, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1975.
- [3] Kozakiewicz P.: Fizyka drewna w teorii i zadaniach. Wybrane zagadnienia, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003.
- [4] Rudziński L.: Konstrukcje drewniane. Naprawy, wzmocnienia, przykłady obliczeń, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2010.
- [5] Wdowiak A.: Analysis of bent timber beam reinforcement with the application of composite materials, Structure and Environment, vol. 8 (1), 2016, pp. 10-16.
- [6] Wdowiak A.: Assessment of technical condition of wooden structures, Proceedings of TRANSCOM 2015, SECTION 7- CIVIL ENGINEERING, pp. 326-332.
- [7] Krzosek S.: Wytrzymałościowe sortowanie polskiej sosnowej tarcicy konstrukcyjnej różnymi metodami, Rozprawy Naukowe i Monografie, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2009.
- [8] Wdowiak A.: Using the visual method to sort polish pine structural sawn timber with respect to strength, Czasopismo Techniczne 2-B/2016, pp. 219-224.

- [9] Wdowiak A., Kroner A.: Wpływ niejednorodności struktury zginanych belek z drewna klejonego na efekt ich wzmocnienia, *Materiały Budowlane* 1/2017, s. 87-89.
- [10] Rudziński L., Wdowiak A.: Strength and structural properties of structural timber, *Structure and Environment*, vol. 8 (2), 2016, pp. 103-108.
- [11] Kokociński W.: *Anatomia drewna*, Poznań 2005.
- [12] PN-D-94021:2013-10 Tarcica konstrukcyjna iglasta sortowana metodami wytrzymałościowymi.

## STRUCTURAL TIMBER CHARACTERISTICS

### Summary

Wood is a basic raw material for paper and pulp industry, and also in power generation. Wood supplies are provided by forests. In Poland, the area of forests continues to increase annually. Since 1945, forest cover has grown by 8.4%. The increment results from afforestation of the land with former agricultural use, and of uncultivated land [1].

In the monograph, the micro- and macroscopic structure of wood from pine *Pinus sylvestris* L. was presented. The wood originated from four selected nature-forest areas of Poland, namely Area A - Mazowiecko – Podlaska Nature-Forest Area (Garwolin Forest Inspectorate), Area B - Małopolska Nature-Forest Area (Przedbórz Forest Inspectorate), Area C - Śląska Nature-Forest Area (Kędzierzyn Koźle Forest Inspectorate), Area D - Karpacka Nature-Forest Area (Piwniczna Forest Inspectorate). Wood microscopic structure analysis was performed for the following conifer species: silver fir *Abies alba* Mill., European larch *Larix decidua* Mill., the wood of which was obtained from a historical structure built in 1860, and pine *Pinus sylvestris* L., the wood of which was exposed to atmospheric conditions and biological degradation for a 5 – year period.

The following features were specified: annual rings, sapwood and heartwood, resin pockets and leaks, and also medullary rays. The distinctive properties of selected coniferous wood species were presented, including heartwood colour, the width of annual rings, sapwood and heartwood content, the occurrence of resin ducts, transition from earlywood to latewood, and also knot structure.

Additionally, the characteristics of the wood of the following species were provided: pine *Pinus sylvestris* L., spruce *Picea abies* Karst., European larch *Larix decidua* Mill., silver fir *Abies alba* Mill., Douglas fir *Pseudotsuga menziesii* Franco [1-2].

**Keywords:** wood, microscopic structure, macroscopic structure, annual rings, sapwood and heartwood, resin pockets and leaks, medullary rays, pine *Pinus sylvestris* L., spruce *Picea abies* Karst., European larch *Larix decidua* Mill., silver fir *Abies alba* Mill., Douglas fir *Pseudotsuga menziesii* Franco

*Przesłano do redakcji: 06.03.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Aleksander DUDA<sup>1</sup>

## WYBRANE SPOSOBY WYKORZYSTANIA ZUŻYTYCH OPON SAMOCHODOWYCH W BUDOWNICTWIE KOMUNIKACYJNYM

W referacie wskazano sposoby wykorzystania zużytych opon dla recyklingu oraz zastosowanie ich w budownictwie komunikacyjnym jako materiału tłumiącego, materiału filtracyjnego (drenaże odporne na przemarzanie), lekkich wypełniaczy (odciążenie), stabilizacji zboczy. Omówiono uwarunkowania prawne w Polsce i Unii Europejskiej dla recyklingu opon. Użycie materiałów gumowych pochodzących ze zużytych opon samochodowych zmniejszy wykorzystanie deficytowych kruszyw naturalnych oraz może być dobrą alternatywą dla kosztownych sposobów wzmacniania gruntu w przypadkach budowy obiektów infrastruktury komunikacyjnej na słabonośnym podłożu. Istotną kwestią jest również to, że sektor recyklingu przesuwa się w kierunku bardziej zrównoważonego przetwarzania opon. Paliwo pochodzące z opon to szybkie rozwiązanie dużego problemu, tym nie mniej tracony jest bezpowrotnie materiał gumowy o unikalnych właściwościach mechanicznych. W referacie ponadto zestawiono projekty europejskie dotyczące rozwoju alternatywnego wykorzystania zużytych opon.

**Słowa kluczowe:** kruszywo gumowe, pakiety z opon, recykling, lekkie zasyпки, stabilizacja osuwisk, projekt badawczy

### 1. Wprowadzenie

Odpadem, którego ilość stale rośnie, są zużyte opony samochodowe. Według Głównego Urzędu Statystycznego w roku 2014 wyprodukowano około 3,4 mln ton zużytych opon samochodowych na terenie Unii Europejskiej, w tym 240 tys. ton w Polsce. Jest to ogromna ilość odpadów, którą należy zagospodarować. Obecnie stosowane sposoby recyklingu opon są niewystarczalne dla uzyskania gwarancji bezpieczeństwa ekologicznego. Istnieje więc potrzeba znalezienia nowych obszarów zastosowań dla recyklingu zużytych opon samochodowych w Polsce. W krajach wysoko rozwiniętych takich jak USA, Kanada, Japonia, zachodnie kraje Unii Europejskiej stawia się na wykorzystanie zużytych opon samochodowych w inżynierii lądowej (tab. 1), której rozwój powiązany jest z rozwojem transportu - gałęzi przemysłu dla którego produkowane są opony samochodowe [12].

---

<sup>1</sup> Aleksander Duda, Politechnika Rzeszowska, Zakład Dróg i Mostów, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 795747868; aduda@prz.edu.pl

Tabela 1. Roczny przyrost zużytych opon w tonach (A) i ich zagospodarowanie w wybranych krajach EU, w tym w budownictwie (C) – na podstawie Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Opon i Wyróbów Gumowych ETRMA 2013, wg [1]

Table 1. The annual increase of waste tires in tonnes (A) and its recovery in selected EU countries, including in civil engineering (F) - according to the European Association of Manufacturers of Tires and Rubber ETRMA 2013, according to [1]

Dane krajowe [tony]	Wielkość zużytych opon	Ponowne wykorzystanie częściowo zużytych opon	Zagospodarowanie pozostałych zużytych opon			Składowiska
			Materiał		Energia	
			Budownictwo C	Recykling D	Odzysk energii E	
Polska	239000	20000	0	51000	168000	0
Hiszpania	292000	58000	8000	114000	112000	0
Francja	381000	79000	38000	128000	147000	0
Belgia	82000	13000	1000	56000	17000	0
EU27+ Norwegia+ Szwajcaria	3273000	574000	242000	1073000	1248000	157000

W Unii Europejskiej [2] sklasyfikowano następujące działania mające na celu rozwiązanie problemu zużytych opon samochodowych:

- zapobieganie**, wykorzystujące edukację społeczeństw, identyfikację problemów i większą dbałość o produkt;
- przygotowanie do ponownego użycia**, np. bieżnikowanie opon lub eksport,
- recykling** produktowy, materiałowy lub/i energetyczny oraz
- odzysk energii** np. polegający na spalaniu opon w piecach cementowni lub wykorzystując procesy mikrofalowe karbonatyzacji opon w elektrowniach.

*Zapobieganie i przygotowanie do ponownego użycia* ma na celu wydłużenie czasu użytkowania pojedynczej opony oraz zmniejszyć zapotrzebowanie na nowy produkt, zmniejszając dzięki temu ilości odpadów odprowadzanych do środowiska. Takie działania prewencyjne nie rozwiązują jednak problemów z zagospodarowaniem odpadów opon, ponieważ finalnie opony i tak trafiają do obiegu odpadów. Całość zużytych opon samochodowych w Polsce podlega recyklingowi materiałowemu, energetycznemu i odzysku energii (tab. 1). Recykling materiałowy polega na rozdrobieniu zużytej opony najczęściej poprzez cięcie i rozcieranie, młotkowanie, rozdrabnianie metodą kriogeniczną lub wodą pod wysokim ciśnieniem [3], [4]. Końcowym produktem rozdrabniania są: guma, druty stalowe oraz kord tekstylny, które podlegają dalszemu recyklingowi. Rozdrobnione gumowe części opony mają szerokie zastosowanie w budownictwie i przemyśle, w zależności od wymiarów uziarnienia rozdrobnionych opon. W normie europejskiej EN-14243 na materiały pozyskiwane z recyklingu opon wprowadzono klasyfikację zaprezentowaną w tabeli 2.

Tabela 2. Klasyfikacja materiałów otrzymywanych ze zużytych opon wg EN-14243 [5]

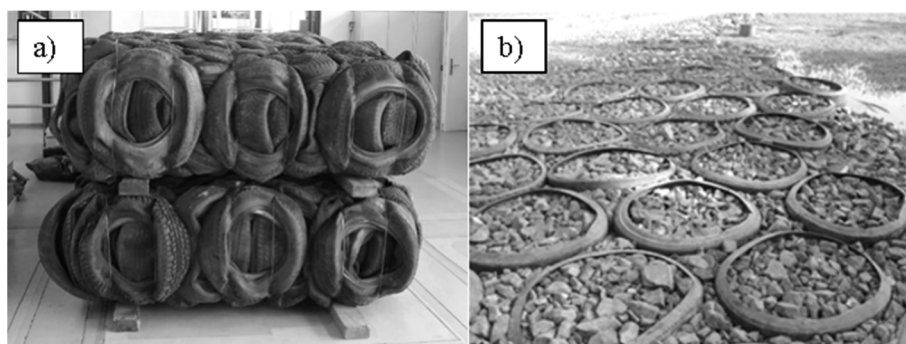
Table 2. Classification of materials derived from used tires according to EN-14243 [5]

Rodzaj rozdrobnionych odpadów gumowych z opon	Wielkość cząstek w [mm]
Opony cięte - połówki, mniejsze (cuts)	>300
Strzępy (shreds)	40 ÷ 300
Czipsy (chips)	10 ÷ 50
Granulat (granulates)	1 ÷ 10
Miał (powder)	0 ÷ 1

Recykling energetyczny opon polega na wysokoenergetycznych procesach ogrzewania całych opon lub ich części bez dostępu tlenu (piroliza), termicznej destrukcji gumy rozpuszczanej w rozpuszczalnikach organicznych (destrukcja) lub dewulkanizacji gumy przez dostarczenie energii termicznej i mechanicznej. W pirolizie podczas termicznego rozpadu powstają produkty gazowe, ciekłe oraz stałe, które można wykorzystać w dalszej obróbce. W skład fazy gazowej wchodzi węglowodory alifatyczne, wodór i siarkowodór, faza ciekła to węglowodory aromatyczne, a stała to zwęglona pozostałość zwana sadzą pizolityczną oraz złom stalowy [6]. W wyniku termicznej destrukcji gumy połączonej z rozpuszczaniem w rozpuszczalnikach organicznych uzyskuje się destrukta gumowy, który stanowi ciągliwą, czarną, lepka masę o konsystencji od gęstopłynnej do półstałej w temperaturze pokojowej, całkowicie rozpuszczalną w produktach naftowych [7]. Głównymi produktami destrukcji są: ropa syntetyczna – 50%, smoła – 30%, złom stalowy – 20%. Zużyte opony samochodowe mogą być zagospodarowane również jako paliwa alternatywne używane w piecach obrotowych w cementowniach, w elektrowniach do produkcji energii elektrycznej wykorzystując mikrofalowe procesy karbonatyzacji opon [8], papieru, wapna, stali oraz w spalarniach śmieci.

Obydwie formy recyklingu oraz odzysk energii z opon stanowią dodatkowe i dotkliwe dla środowiska obciążenie związane z zanieczyszczeniem (spalanie) lub koniecznością zużycia dużych ilości energii (recykling materiałowy i energetyczny). Preferowanym rozwiązaniem problemu zużytych opon samochodowych w Polsce może być recykling produktowy. Polega on na ponownym wykorzystaniu w całości lub w części opon z ewentualnym wykorzystaniem niskoenergetycznych procesów przetwarzania, np. odcięcie jednego profilu opony i wypełnienie jej kruszywem (materace z opon) lub prasowanie opon w pakiety (rys. 1). Taka forma recyklingu wykorzystuje unikalne właściwości opon, do których należą: mały ciężar objętościowy, dobra izolacyjność termiczna i akustyczna, właściwości drenażowe, wibroizolacyjne, dobre właściwości mechaniczne (tab. 3). Materiał poddany tej formie recyklingu najlepiej nadaje się do wykorzystania w budownictwie, w tym szczególnie w budownictwie komunikacyjnym i hydrotechnicznym. Opony poddane recyklingowi produktowemu mogą stanowić i stanowią wypełnienie nasypów i konstrukcji oporowych, podbudowę dróg, zabezpieczenie przeciwoerozyjne brzegów rzek i nabrzeży oraz służyć do stabilizacji osuwisk. Dodat-

kowo, w przypadku prasowania opon w pakiety, znacząco redukuje się objętość składowanych opon oraz ułatwia się ich transport i późniejsze wbudowanie w konstrukcję ziemną, a tym samym ograniczając koszty całkowite budowy.



Rys. 1. Przykład recyklingu produktowego opon: (a) pakiety sprasowanych zużytych opon samochodowych (SZOS), oraz (b) konstrukcja nawierzchni z opon, na podstawie [9, 10]

Fig. 1. Example of tyre product recycling:(a) tyre bales and (b) construction of tyre pavement, based on [9, 10]

Tabela 3. Porównanie właściwości pakietów SZOS z kruszywami naturalnymi

Table 3. Comparison of the properties of tire bales with natural aggregates

Cecha	Pakiety SZOS	Kruszywo mineralne (piaski, żwiry)	Źródło
Ciężar objętościowy [ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	5 ÷ 6	18 ÷ 20	[11]
Kąt tarcia [ $^{\circ}$ ]*	35 ÷ 36	[-]	[12]
Kąt tarcia wewnętrzznego [ $^{\circ}$ ]	[-]	35 ÷ 40	[-]
Moduł odkształcenia [MPa]	0,8 ÷ 1,3	40 ÷ 100	[11]
Współczynnik filtracji [ $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	2 ÷ 4	0,1 ÷ 1	[11]
Przewodność cieplna [ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ]	0,07	0,4 ÷ 0,7	[12]
Wibroizolacyjność	bardzo wysoka	niska	[12]

\* wartość odnosi się do poślizgu między pakietami bez warstwy zasypki

## 2. Uwarunkowania legislacyjne w zakresie gospodarowania zużytymi oponami samochodowymi

### 2.1. Unia Europejska

Z punktu widzenia zagospodarowania odpadów gumowych ze zużytych opon samochodowych największe znaczenia mają trzy dyrektywy unijne: (1) Landfill 1999/31/EC [13], (2) End – of - Life Vehicle 2000/53/EC [14] i (3) Waste Incineration 2000/73/EC [15]. Pierwsza z uchwalonych w 1999r. dyrektyw dotyczyła zakazu składowania całych opon samochodowych od lipca 2003 r. oraz ich rozdrobnionych części od lipca 2006 r. Wszystkie kraje członkowskie miały być zobowiązane

wprowadzić w życie powyższe ustalenia. Dyrektywa (2) uchwalona w 2000r. określała sposób postępowania z pojazdami po zakończeniu ich eksploatacji. Narzucała ona obowiązek na europejskich producentów pojazdów do odzysku 85% i recyklingu 80% masy pojazdu od roku 2006 a od roku 2015 odpowiednio 95% i 85%. Zgodnie z dyrektywą pojazdy przed złomowaniem powinny mieć zdjęte wszystkie opony. Również w roku 2000 została uchwalona trzecia z dyrektyw Waste Incineration 2000/73/EC. Zobowiązuje ona cementownie, wykorzystujące zużyte opony samochodowe jako paliwo alternatywne, do wprowadzenia wyższych limitów dotyczących emisji szkodliwych gazów odlotowych tlenków azotu  $\text{NO}_x$  do  $800\text{mg/m}^3$  [16]. W poszczególnych krajach członkowskich powstały spółki i organizacje, które miały być odpowiedzialne za zbiórkę, składowanie, transport i recykling zużytych opon. Finansowanie tych zamierzeń w krajach Unii Europejskiej spoczywa na producentach opon (np. kraje skandynawskie, Polska, Francja), obowiązuje system wolnorynkowy (np. Niemcy, Wielka Brytania, Austria) lub odpowiedzialność przejmującą rząd państwa (np. Dania, Słowacja, Chorwacja) [17].

## 2.2. Polska

Wprowadzone w życie ustawy były następstwem uchwalonych dyrektyw unijnych [11]. Pierwsza, z dnia 27 kwietnia 2001r. ustawa o odpadach [18] wprowadzała zakaz składowania zużytych opon samochodowych, zgodnie z dyrektywą wprowadzającą Landfill 1999/31/EC. Ustawy [19, 20] regulują dodatkowe przepisy recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji. Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. [21] nakładała obowiązek zagospodarowania zużytymi oponami na producentów i importerów. W tej ustawie została również uchwalona opłata produktowa i depozytowa, nakładana na producentów i importerów opon, którzy nie wywiążą się z nałożonego w ustawie poziomu odzysku opon. W roku 2007 odzysk ten wynosił 75%. Obowiązek recyklingu zużytych opon został wprowadzony od roku 2004 na mocy tzw. ustawy „czyszczącej” [22] z dnia 7 lutego 2003 r. Od roku 2007 poziom recyklingu opon wynosi 15%. Należy zaznaczyć, że bieżnikowanie opon traktowane jest jako odzysk, a nie recykling. Aktualnie poziom odzysku i recyklingu utrzymane są na tym samym poziomie czyli odpowiednio 75% i 15%, a wysokość opłaty produktowej wynosi 5,80 zł/kg za opony nowe oraz 10,82zł/kg za opony używane.

## 3. Przegląd projektów europejskich dotyczących wykorzystania zużytych opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym

### 3.1. Projekt Eco-lanes

Projekt był realizowany w latach 2007 – 2009. Głównymi celami projektu było rozwijanie infrastruktury transportu dla nawierzchni przy użyciu rozścielania i zagęszczania walcami na podstawie asfaltu modyfikowanego gumą i betonem zbrojonego włóknami stalowymi (SFRC). Korzyścią nowych koncepcji była re-

dukcja kosztów budowy o 10÷20%, skrócenie czasu realizacji o 15%, o 40% mniejsze zużycie energii w budownictwie drogowym, minimalizacja procesu utrzymania dróg, a przede wszystkim użycie materiałów odpadowych z recyklingu opon samochodowych. W projekcie zaangażowanych było 11 partnerów z 6 krajów. Liderem projektu był Uniwersytet Sheffield – jako ekspert od SFRC. W projekcie zostały wykonane trzy odcinki demonstracyjne nawierzchni dróg w różnym klimacie (Anglia, Rumunia, Cypr) [23].

### **3.2. Projekt Anagennisis**

Projekt koncentruje się na innowacyjnym ponownym wykorzystaniu wszystkich składników opon w betonie. Z opony można nie tylko uzyskać granulaty gumy, ale także złom stalowy i tekstylny, który jest istotną częścią opony, ale uznawany za mniej szlachetny komponent. Celem tego projektu jest opracowanie innowacyjnych rozwiązań w celu ponownego użycia zużytych opon we wszystkich komponentach betonowych o wysokiej wartości innowacyjnej, mających korzystny wpływ na środowisko. W projekt zaangażowanych jest 17 partnerów z 8 krajów. Liderem projektu jest Uniwersytet Sheffield. Projekt jest realizowany od czerwca 2014 r. i jest zaplanowany na 42 miesiące [24].

### **3.3. Projekt PERSUADE**

Celem projektu było opracowanie na temat rozwoju nowych nawierzchni drogowych o bardzo wysokim efekcie redukcji hałasu. Nawierzchnie zawierały kruszywo z recyklingu opon, zamiast tradycyjnego kruszywa łamanego. Były one zaprojektowane z dużym udziałem pustek powietrznych. Taka konstrukcja nawierzchni porowatej w połączeniu z granulatem gumowym uczyniła ją elastyczną, co przyczyniło się do zmniejszenia hałasu na styku opony z drogą. Poroelastyczne nawierzchnie dróg (PERS) będą mogły być wykorzystywane odcinkowo w miejscach, w których poziom hałasu jest bardzo wysoki lub stosowanie ekranów akustycznych jest niemożliwe. W projekt zaangażowanych było 12 partnerów z 8 krajów. W projekcie brało udział dwóch partnerów z Polski: Instytut Badawczy Dróg i Mostów z Warszawy oraz Politechnika Gdańska. Projekt realizowany był od czerwca 2009 r. i zaplanowany na 72 miesiące [25].

### **3.4. Projekt RECTYRE**

Projekt realizowany był w latach 2009-2012. Głównym celem projektu było zademonstrowanie technicznych i rynkowych możliwości nowego zastosowania pociętych opon samochodowych, jako nowego produktu przeznaczonego na sprzedaż bez konieczności jakiegokolwiek obróbki termicznej lub chemicznej. Nowy materiał, jakim było kruszywo gumowe, idealnie nadawał się jako lekki wypełniacz nasypów drogowych. Wbudowanie sztucznego kruszywa w nasyp oszczędzało naturalne złoża kruszyw mineralnych, zmniejszało jego osiadania oraz

chroniło warstwy nasypu przed mrozem (rys. 3.). W projekt zaangażowanych było 5 partnerów z 4 krajów. Jednym z partnerów był Mostostal Warszawa, odpowiedzialny za wykonanie w Polsce pilotażowego odcinka nasypu z wypełnieniem kruszywem gumowym [26].



Rys. 3. Etapy realizacji nasypu drogowego: a) wyrównanie kruszywa gumowego, b) układanie nawierzchni, na podstawie [27]

Fig. 3. Stages of erecting road embankment: a) leveling the rubber aggregate, b) laying the pavement, based on [27]

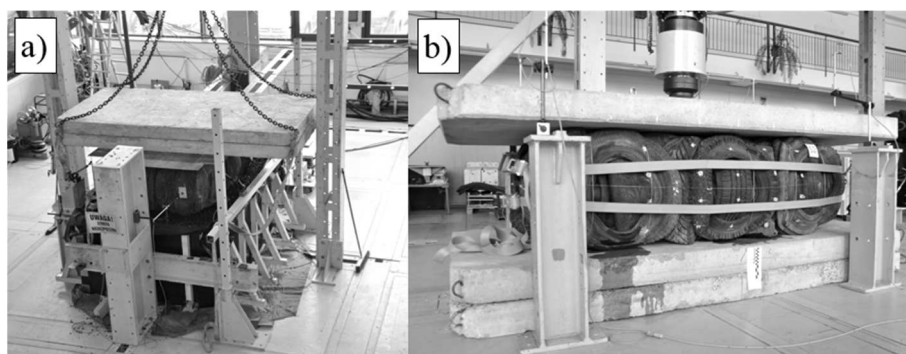
### 3.5. Projekt ROADTIRE

Projekt realizowany był w latach 2009-2011. Celem projektu było innowacyjne wykorzystanie gumy z recyklingu opon w budowie nawierzchni drogowych. Projekt stawiał na promowanie i wykorzystanie całego cyklu życia opony w budowie i utrzymaniu dróg. W greckim mieście Lamia wykonano pilotażowe odcinki nawierzchni drogowych z użyciem asfaltu oraz granulatu z opon. W około 6000 m<sup>2</sup> miejskich odcinków dróg została położona 5 cm warstwa nawierzchni wykonana z materiału demonstracyjnego, który posłużył do przeprowadzenia badań laboratoryjnych i polowych. W projekt zaangażowanych było 4 partnerów z 2 krajów (Grecja, Włochy) [28].

### 3.6. Projekt ReUse

Projekt realizowany jest w latach 2015-2018. Celem projektu ReUse jest opracowanie tanich, przyjaznych dla środowiska i innowacyjnych materiałów uzyskanych z recyklingu zużytych opon samochodowych (geokompozytów gumowych) na zasypkę przyczółków mostów zintegrowanych, układaną w strefie połączenia nasypu komunikacyjnego z obiektem i wdrożenie ich do budowy trwałych zintegrowanych obiektów mostowych na inwestycjach realizowanych przez partnerów konsorcjum biznesowego. W skład konsorcjum wchodzi firmy Remost Dębica sp. z o.o., Promost Consulting sp. z o.o. sp. k. (lider konsorcjum), Geotech Rzeszów sp. z o.o. oraz Politechnika Rzeszowska. W ramach poszczególnych zadań projektu Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej prowadzi badania laboratoryjne obejmujące (rys. 4.):

- określenie oporów tarcia geokompozytów złożonych z pakietów SZOS oraz kruszywa naturalnego (piasek średni, keramzyt, chipsy z opon),
- sztywność pakietów SZOS,
- pełzanie pakietów SZOS,
- zmęczenie pakietów SZOS,
- nośność drutów spinających pakiety SZOS,
- naciąg drutów spinających pakiety SZOS.



Rys. 4. Wybrane badania laboratoryjne: a) wytrzymałości na ścinanie pakietów SZOS, określenie sztywności pakietów SZOS

Fig. 4. Selected laboratory tests: a) shear strength of tyre bales, determination of stiffness of tyre bales

Badania laboratoryjne pakietów SZOS potwierdziły założenia przyjęte do programowania aktualnie realizowanych badań polowych na wielkogabarytowym stanowisku badawczym zlokalizowanym w Dębicy, Polska. Badania polowe obejmują (rys. 5):

- określenie rozkładów parcia na przyczółek mostowy dla różnych schematów,



Rys. 5. Stanowisko do badań polowych: a) wypełnienie komory badawczej pakietami SZOS i materiałem zasypowym, b) próbne obciążenie dynamiczne

Fig. 5. The test stand for field testing: a) filling test chamber with tyre bales and backfill material, b) dynamic proof test

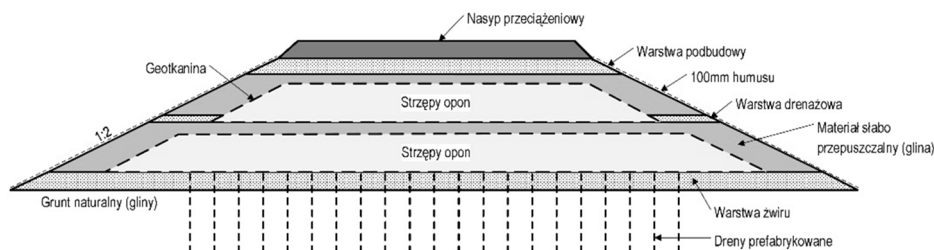


- wypełnienia zasypką (pakiety SZOS + strzępy z opon, pakiety SZOS + piasek, piasek) w cyklicznych przemieszczeniach poziomych ściany korpusu,
- określenie deformacji pionowych w strefie dojazdu do przyczółka mostowego, poprzez statyczne i dynamiczne testy obciążeniowe,
- określenie zdolności do tłumienia/redukcji drgań w strefie dojazdu,
- badania środowiskowe pakietów SZOS.

#### 4. Przykłady wykorzystania zużytych opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym

##### 4.1. Nasyp autostradowy w Portland, Stany Zjednoczone

Strzępy z opon samochodowych zostały użyte jako lekkie wypełnienie nasypów autostradowych w Portland w 1998 r. Wysokość nasypu wynosiła ok 9,75 m. Posadowiony jest on na 12 – metrowej warstwie słabonośnych glin morskich. Projektanci nasypu przeanalizowali kilka rozwiązań projektowych, między innymi wzmocnienie podłoża lub użycie lekkich materiałów do budowy nasypów w tym: zużytych opon samochodowych, płyt styropianowych czy kruszywa keramzytowego. Wypełnienie za pomocą pociętych opon samochodowych okazało się najtańszym rozwiązaniem, które jednocześnie pozwoliło na ponowne użycie 1,2 mln zużytych opon.



Rys. 6. Przekrój poprzeczny nasypu drogowego w Portland z wypełnieniem strzępami opon, na podstawie [30]

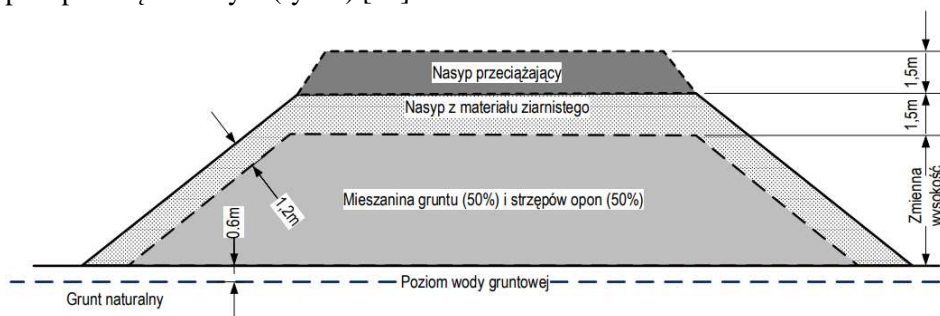
Fig. 6. The cross section of motorway embankment in Portland filled with scraps of tires, based on [30]

Strzępy z opon ułożone były w dwóch blokach, każdy 3 m grubości, oddzielonych warstwą glin o miąższości 0,9 m (rys. 6). Przewarstwienie z gruntu miało na celu zabezpieczenie nasypu przed wzrostem temperatury w jego wnętrzu. Pocięte opony były otoczone geotkaniną, pełniącą rolę separatora między gumowym wypełnieniem, a warstwą słabo przepuszczalnych glin. Kruszywo gumowe było zagęszczane w 6 warstwach (0,5 m każda) przy pomocy 10 – tonowego walca wibracyjnego. Wykonane zagęszczenie było zgodne z zaleceniami normy [30] dotyczącymi grubości zagęszczanych warstw, masy sprzętu zagęszczającego oraz liczby przejazdów niezbędnych do zagęszczenia warstwy. Na licu skarp została ułożona

10 cm warstwa humusu dla obsiania roślinnością. Nasyp został zwieńczony 1,2 m warstwą podbudowy z kruszywa oraz tymczasowo nasypem przeciążeniowym grubości 1,2 m, który miał przyspieszyć konsolidację osiadań słabego podłoża [30].

#### 4.2. Nasyp autostradowy w Virginii, Stany Zjednoczone

Strzępy z opon wykorzystano również do budowy dwóch nasypów autostradowych przy węźle 646 w Virginii. Użycie lekkiego wypełnienia było konieczne ze względu na ograniczenie osiadań słabego podłoża oraz wysoki poziom wód gruntowych. Wysokość nasypu w czasie budowy dochodziła do 9 m (w tym 1,5 m nasyp przeciążeniowy), a wysokość wbudowanych strzępów z opon sięgała 6 m. Kruszywo gumowe zostało wymieszane z gruntami miejscowymi (piasek gliniasty) w stosunku 1:1 (50% objętości strzępy opon). Całość została przykryta warstwą dociążającą podbudowy grubości 1,5 m oraz wspomnianym wcześniej nasypem przeciążeniowym (rys. 7) [32].



Rys. 7. Schemat lekkiego nasypu gumowo-gruntowego zbudowanego w Virginii, 1994, na podstawie [32]

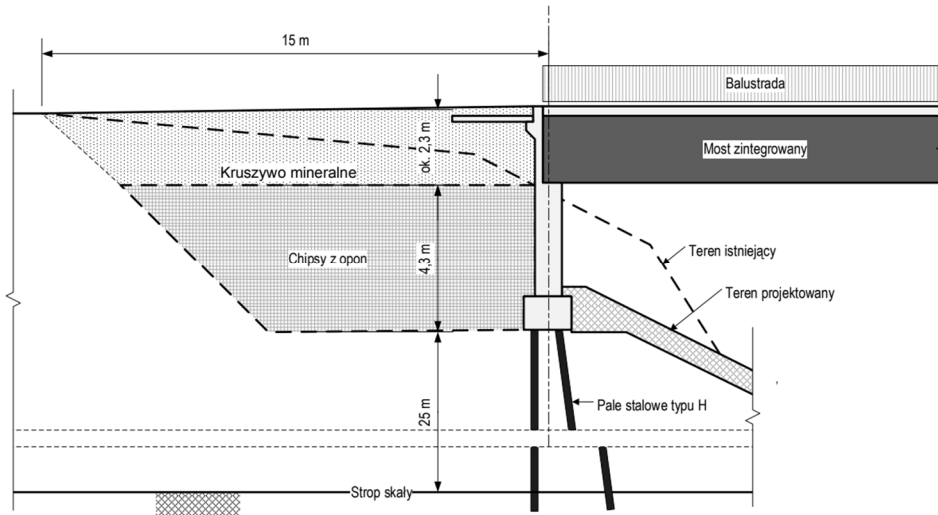
Fig. 7. Schematic of light embankment of rubber-ground built in Virginia, 1994, based on [32]

#### 4.3. Zasyпка przyczółka mostu w Spring Stany Zjednoczone

Kruszywo gumowe wykorzystano także jako zasypkę za przyczółkiem mostu zintegrowanego w Spring. W podłożu zalegała 15 metrowa warstwa plastycznych glin, która zagrażała stateczności zbocza. Lekka zasyпка z kruszywa gumowego okazała się najtańszym rozwiązaniem, która zmniejszyła boczne parcie gruntu działające na stalowe pale fundamentowe. Grubość wbudowanej warstwy chipsów gumowych wynosiła 4,3 m. Pocięte opony były oddzielone od otaczającego gruntu za pomocą geotkaniny. W projekcie zostało wykorzystanych 400 tys. zużytych opon samochodowych. Na rysunku 8 przedstawiony jest przekrój podłużny przyczółka mostowego z wbudowaną w zasypkę warstwą kruszywa gumowego [29].

#### 4.4. Zasyпка za przyczółkiem wiaduktu w Tompshan, Stany Zjednoczone

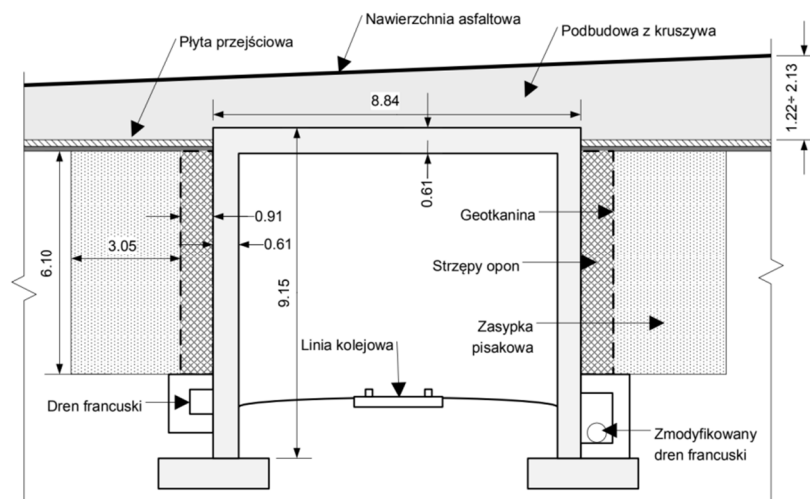
Lekka zasyпка ze strzępów gumowych została również zastosowana przy budowie wiaduktu drogowego w Tompshan. Ustrojem nośnym wiaduktu jest



Rys. 8. Przekrój podłużny przyczółka mostu w Spring, 1998, na podstawie [29]

Fig. 8. Longitudinal section of the bridge abutment in Spring, 1998, based on [29]

sztynna rama żelbetowa, posadowiona na palach żelbetowych. Wysokość ramy wynosi 9,15 m (wypełnienie do 11 m wysokości), długość 8,84 m oraz szerokość całkowita około 91,0 m. Przeszkodą jest jednotorowa linia kolejowa. Dzięki zastosowaniu strzępów gumowych na zasyrkę parcie gruntu na pionowe ściany przyczółków zostało zmniejszone o 50% w stosunku do tradycyjnych materiałów wypełniających (rys.9) [30].



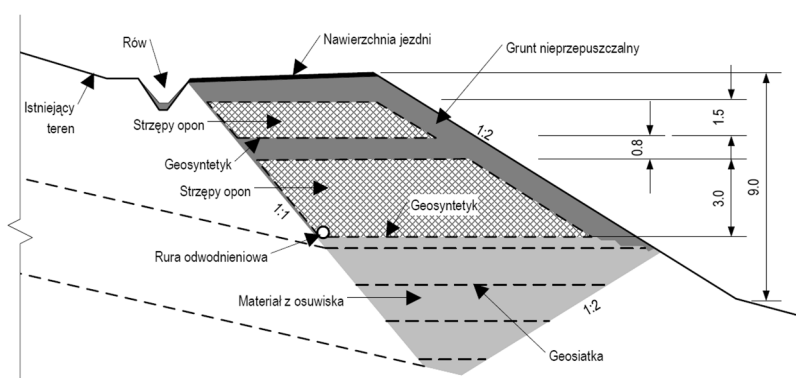
Rys. 9. Przekrój podłużny wiaduktu drogowego w Tompshan, 1996, na podstawie [30]

Fig. 9. Longitudinal section of the road viaduct in Tompshan, 1996, based on [30]

Grubość warstwy strzępów wynosiła 0,91 m (3 ft). Pocięte opony były oddzielone od właściwej zasypki grubości 3,05 m (10 ft) za pomocą geotkaniny. Znacząca redukcja parcia gruntu umożliwiła projektantom zaprojektowanie ścian przyczółków o grubości wynoszącej zaledwie 610 mm. W czasie realizacji wiaduktu użyto około 100 tys. zużytych opon samochodowych.

#### 4.5. Naprawa osuwiska drogowego w Ukiah, Stany Zjednoczone

Na odcinku drogi Marina Drive w Ukiah wykorzystano strzępy gumowe do naprawy osuwiska. Przekrój poprzeczny nasypu pokazano na rysunku 10. Strzępy opon zostały ułożone w dwóch warstwach odpowiednio 1,5 m i 3,0 m grubości, oddzielonych warstwą gruntu słabo przepuszczalnych. Kruszywo gumowe zamknięto warstwą geosyntetyku dla separacji z gruntem. W budowie podstawy nasypu wykorzystano grunt osuwiskowy wzmocniony zbrojeniem w postaci geosiatek [33].

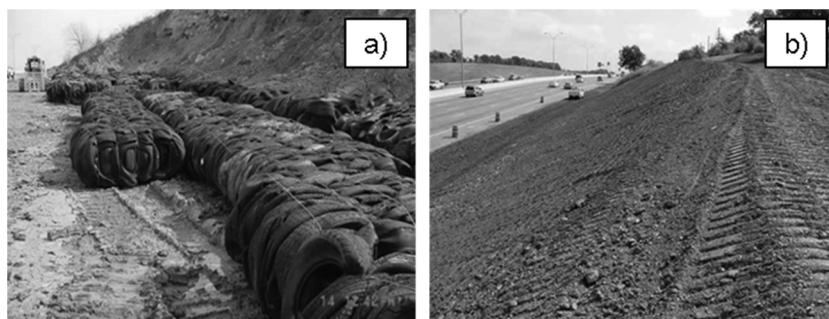


Rys. 10. Przekrój poprzeczny nasypu w miejscu naprawy osuwiska, na podstawie [33]

Fig. 10. The cross-section of the embankment at the site of the landslide repairs, based on [33]

#### 4.6. Naprawa skarpy przy autostradzie 30 w Teksasie, Stany Zjednoczone

W roku 2001 przy autostradzie międzystanowej 30 w Teksasie doszło do ruchów osuwiskowych. Obsunęła się skarpa wysokości 6,1 m na długości 46 m [33]. W podłożu zalegały gliny, gliny zwięzłe oraz ropy pyłaste bardzo podatne na wzrost zawilgocenia (kąt tarcia wewnętrzznego  $12\div 20^\circ$  oraz spójność  $5\div 12$  kPa). Zdecydowano się odtworzyć skarpe przy pomocy pakietów sprasowanych zużytych opon samochodowych (SZOS). Sprasowane opony spinane są wiązkami z drutów wysokiej wytrzymałości (rys.11). Pakiety SZOS są rozwiązaniem korzystnym z uwagi na ich unikalne właściwości mechaniczne (tab. 3), takie jak dla kruszywa gumowego, a ponadto wpływają korzystnie na ograniczenie kosztów, zwiększenie możliwości transportowych i łatwość wbudowania w konstrukcję ziemną. Na rysunku 8 znajdują się zdjęcia z realizacji robót przy odbudowie skarpy nasypu.

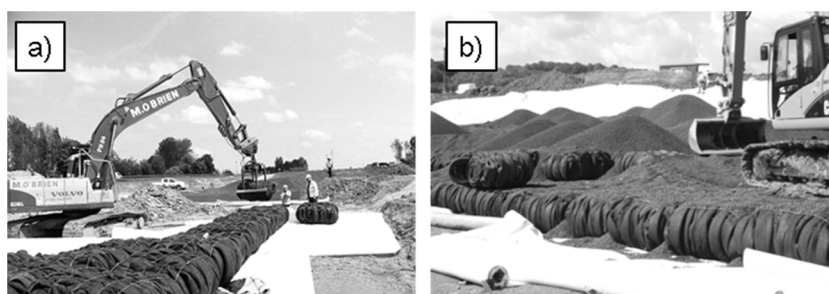


Rys. 11. Naprawa skarpy nasypu: a) wbudowanie pakietów SZOS b) zasypanie i profilowanie skarp, na podstawie [34]

Fig. 11. Repair of embankment slope: a) incorporation of tyre bales b) backfilling and profiling of the slope, based on [34]

#### 4.7. Autostrada A421 w Marston Moretaine, Wielka Brytania

Na newralgicznym odcinku projektowanej w roku 2010 autostrady A421 stwierdzono występowanie odkształcalnych gruntów miękkoplastycznych o nośności 25-35 kPa i miąższości 20 m. Po przeprowadzeniu analizy ekonomicznej różnych proponowanych rozwiązań wybrano pakiety SZOS na lekki materiał wypełniający nasyp. Pustki pomiędzy pakietami zostały wypełnione lekkim kruszywem keramzytowym (rys. 12). Nad pakietami SZOS zastosowano warstwę transmisyjną o grubości 1 m, a przez 6 miesięcy zbudowany w ten sposób nasyp był przeciążany w celu przyspieszenia konsolidacji odkształcalnego podłoża [35]. Omawiany przykład to pierwsze użycie pakietów SZOS do budowy drogi krajowej.



Rys. 12. Prace przy wykonywaniu nasypu: a) wbudowanie pakietów SZOS, b) wypełnienie pakietów SZOS lekkim kruszywem keramzytowym, na podstawie [35]

Fig. 12. Work on the construction of embankment: a) incorporation of the tyre bales b) filling tyre bales with Light Expanded Clay Aggregate (LECA), based on [35]

## 5. Podsumowanie

Współcześnie wiele odpadów jest postrzeganych jako wartościowe źródło surowca. Rynek przetwarzania odpadów rozszerza się na nowe obszary. Zużyte opony są odpadem niezwykle uciążliwym, ponieważ nie ulegają procesom biodegradacji oraz stanowią poważne zagrożenie pożarowe. Nie można ich składować na wysypiskach ze względu na możliwość samozapłonu. Energia lub paliwo uzyskane z opon wydaje się być dobrym rozwiązaniem tego problemu, ale w rzeczywistości bywa to dalekie od efektywnego zagospodarowania tego odpadu. Gdy opona jest spalana w piecu cementowym to jest stracona na zawsze, produkując przy tym duże ilości gazów cieplarnianych. Opony ponownie przetworzone w celu wytworzenia produktów o wyższej wartości lub odtworzenia materiałów dają drugie, trzecie, a nawet czwarte życie surowca, który w ostatecznej fazie użytkowania może wciąż być spożytkowany na paliwo. Dlatego nadrzędnym celem producentów i organizacji zajmujących się recyklingiem opon powinno być dążenie do jak najdłuższego okresu czasu między końcem życia opony, a jej likwidacją w elektrowniach i cementowniach.

Przedstawione przykłady wykorzystania zużytych opon w budownictwie komunikacyjnym oraz realizacji projektów badawczych dają duży potencjał do wdrożenia alternatywnego zagospodarowania zużytych opon w Polsce, szczególnie poprzez prasowanie opon w pakiety. Wyniki badań laboratoryjnych i polowych realizowanych obecnie w ramach projektu badawczego ReUse, będą po ich zakończeniu przedmiotem odrębnych publikacji.

*Referat przygotowano w ramach projektu współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego pt. "ReUse - Innowacyjne materiały z recyklingu, zwiększające trwałość obiektów mostowych" (Innotech nr K3/IN3/38/228116/NCBiR/15).*

## Literatura

- [1] <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20131015---statistics-booklet-2013-final2.pdf>(dostęp: 31.07.2017 r.).
- [2] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council.
- [3] Sybilski D., Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym, Przegląd Budowlany 2009, 5, 37-44.
- [4] Trzaska E.: Zagospodarowanie zużytych opon w budownictwie drogowym. Nafta-Gaz, nr 10/2010, s. 947-951.
- [5] DD CEN/TS 14243:2010 - Materials produced from end of life tyres. Specification of categories based on their dimension(s) and impurities and methods for determining their dimension(s) and impurities.
- [6] <http://www.pirolizaopon.pl/>(dostęp: 31.07.2017 r.).
- [7] Oprzędkiewicz J., Stolarski B.: Technologia i systemy recyklingu w Polsce. WNT, Warszawa 2003.
- [8] Wojciechowski A., Michalski R., Kamińska E.: „Recykling opon”, Międzynarodowa Konferencja N-T „Problemy Recyklingu 2011”, Józefów k/Otwocka, 5-8 października 2011 r.

- [9] [www.ecoflex.com.au](http://www.ecoflex.com.au) (dostęp: 31.07.2017 r.).
- [10] A. Duda, D. Sobala, T. Siwowski, D. Kaleta.: „Wykorzystanie materiałów z recyklingu opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym”, *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej*, 21/2016
- [11] PAS 108:2007 - Specification for the production of tire bales for use in construction. British Standards Institution
- [12] Zornberg, J. G., Christopher, B. R., and Oosterbaan, M. D. (2005), *Tire Bales in Highway Applications: Feasibility and Properties Evaluation*. Colorado Department of Transportation, Report No. CDOT-DTD-R-2005-2, Denver, Colorado.
- [13] Council Directive 99/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- [14] The End of Life Vehicles (ELV) Directive (2000/53/EC).
- [15] Directive 2002/73/EC of the European Parliament and of the Council of 23 September 2002 .
- [16] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów (Dz.U. 2014 poz. 1546.).
- [17] [http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20150408---statistics-booklet-2014-final2-\(modified\).pdf](http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20150408---statistics-booklet-2014-final2-(modified).pdf)(dostęp: 31.07.2017 r.).
- [18] Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz. U. 2001, Nr 62, poz. 628).
- [19] Ustawa z dnia 27 maja 2015 r. o zmianie ustawy o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2015 poz. 933).
- [20] Ustawa z dnia 20 stycznia 2005 r. o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji (Dz.U. 2005 nr 25 poz. 202).
- [21] Ustawa z dnia 11 maja 2001 r. o obowiązkach producentów niektórych wyrobów oraz o opłacie produktowej i depozytowej (Dz. U. Nr 63, poz. 639 z późniejszymi zmianami).
- [22] Ustawa czyszcząca z dnia 7 lutego 2003 r. wprowadzająca również od 2004 r. obowiązek recyklingu zużytych opon(DZ. U. 2003, Nr 7, poz. 78).
- [23] EcoLanes, “Economical and Sustainable Pavement Infrastructure for Surface Transport”, Publishable Final Activity Report, The University of Sheffield, 2009.
- [24] <http://anagennisi.org/wordpress/>(dostęp: 31.07.2017 r.).
- [25] <http://persuade.fehrl.org/>(dostęp: 31.07.2017 r.).
- [26] <http://www.rectyre.solintel.eu/>(dostęp: 31.07.2017 r.).
- [27] J. Jurczok, M. Kabala, „Nasyp drogowy o warstwach konstrukcyjnych ze strzępów gumowych”, *Autostrady* 3/2012.
- [28] <http://www.roadtire.eu/index.htm>(dostęp: 31.07.2017 r.).
- [29] D. Humphrey; *Civil Engineering Applications Using Tire Derived Aggregate(TDA)*, California Integrated Waste Management Board 2011.
- [30] Humphrey, D.N.: "Civil engineering applications of tire shreds." *Proceedings of the Tire Industry Conference*, Clemson University, 1999, pp. 1-16.
- [31] ASTM. 1998. *ASTM Standard Practise for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications*. ASTM standard D 6270-98. American Society for Testing and Materials. Washington D.C.
- [32] Hoppe, E.J., "Field Study of Shredded-Tire Embankment," *Report No. FHVA/NA-94-IRI*, Virginia Department of Transportation, Richmond, V.4, 1994.

- [33] Kennec, Inc. Project Manual and Specifications, Marina Drive Slide Repair, CR266 at M.P. 0.63, Mendocino County, California, June 2007.
- [34] Prikryl, W., Williammee, R. and Winter, M. G.: "Slope Failure Repair Using Tyre Bales at Interstate Highway 20, Tarrant County, Texas, USA," Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 38, pp. 377-386. 2005.
- [35] Hodgson, I. F., Beales, S. P. and Curd, M. J.: "Use of tyre bales as lightweight fill for the A421 improvements scheme near Bedford, UK". Engineering Geology Special Publications, 26, 101-108, 2012. <https://doi.org/10.1144/EGSP26.12>.

## SELECTED WAYS USE OF WASTE TYRE RUBBER IN CIVIL ENGINEERING

### Summary

The paper presents the ways of reuse waste tires and their application in transport infrastructure as a damping and drainage material, lightweight fillers (reduce weight), stabilization of slopes. Legal conditions in Poland and the European Union for tire recycling are discussed. Reuse rubber will reduce the use deficit natural aggregates and can be a good alternative for expensive ways in case of construction of communication infrastructure facilities on weak ground. Another issue is also that the recycling sector moves towards a more sustainable route to process tyres. Tyre-derived fuel is a quick solution to a large problem, but is lost irrevocably wasted rubber material with unique mechanical properties. In the last chapter will be presented the European projects for the development of alternative reuse of waste tires.

**Keywords:** rubber aggregates, tyre bales, recycling, light backfill, stabilization of landslides, research project

*Przesłano do redakcji: 13.09.2017 r*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Michał BIENIASZ<sup>1</sup>  
 Tadeusz GARGULA<sup>2</sup>

## OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA GEODEZYJNYCH TECHNIK POMIARÓW DO WYZNACZANIA DEFORMACJI GÓROTWORU NA TERENIE KOPALNI SOLI „KŁODAWA”

Jednym z aspektów funkcjonowania głębinowej kopalni soli jest osiadanie powierzchni terenu i części górotworu, znajdującego się ponad wyrobiskami. Proces ten powinien być stale monitorowany, m.in. poprzez pomiary geodezyjne. Celem pracy jest pokazanie możliwości zastosowania geodezyjnych technik do badania zjawiska deformacji górotworu w obszarze eksploatacji złoża soli kamiennej w Kopalni Soli „Kłodawa”. Pierwszym etapem podjętych prac była stabilizacja wielofunkcyjnej sieci obserwacyjnej w wyrobiskach najwyższych poziomów kopalni. Następnie sieć została pomierzona z zastosowaniem kilku technik pomiarów geodezyjnych. Finalnym efektem pracy jest analiza otrzymanych wyników pomiarów w odniesieniu do danych archiwalnych. Wyniki tej analizy mają posłużyć do określenia kierunków działań zmierzających do zapewnienia dalszej, bezpiecznej i efektywnej eksploatacji wysadu kłodawskiego.

**Słowa kluczowe:** przemieszczenia, konwergencja, stabilizacja reperów, niwelacja

### 1. Wstęp

W celu zapewnienia bezpiecznego funkcjonowania głębinowej kopalni soli kamiennej (m.in. Kopalni Soli „Kłodawa”) niezbędne staje się prowadzenie stałej obserwacji oraz kontroli zjawisk towarzyszących eksploatacji. Jednym z tych zjawisk jest proces osiadania powierzchni terenu i części górotworu znajdującego się nad wyrobiskami kopalnianymi. Proces ten powinien być stale monitorowany przez odpowiednie, powołane do tego służby miernicze (geodezyjne) i geologiczne, których zadaniem jest wykonywanie cyklicznych obserwacji specjalnych sieci pomiarowych. Nadrzędnym celem tych działań ma być zapewnienie należytego bezpieczeństwa załogi kopalni oraz mieszkańców terenów objętych zasięgiem

---

<sup>1</sup> Michał Bieniasz, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji; Katedra Geodezji; michalbieniasz@interia.pl

<sup>2</sup> Autor do korespondencji/ corresponding author: Tadeusz Gargula, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji; Katedra Geodezji; tadeusz.gargula@urk.edu.pl

wpływów eksploatacyjnych. Innym ważnym aspektem jest zagwarantowanie jak najdłuższej i efektywnej eksploatacji złoża.

W niniejszej pracy wykorzystane zostały m.in. doświadczenia autora [2], zdobyte dzięki współpracy z firmą „Chemkop” [15], prowadzącą pomiary w podziemnych wyrobiskach Kopalni Soli „Kłodawa”. Prace przygotowawcze polegały na zastabilizowaniu specjalnej sieci pomiarowej, służącej do badania deformacji stropowej półki ochronnej nad filarowo - komorowym górotworem pól eksploatacyjnych kopalni. Do badania deformacji wykorzystuje się m.in. geodezyjne techniki pomiarowe (pomiary niwelacyjne i długościowe). Założona sieć obserwacyjna powinna mieć charakter kompleksowy, pozwalający rejestrować oraz monitorować wszelkie deformacje wnętrza górotworu nad kilkoma polami eksploatacji w kłodawskiej kopalni. Przedmiotem prowadzonych pomiarów będą przemieszczenia pionowe wnętrza górotworu w rejonie spągu półki ochronnej, przemieszczenia poziome na wydzielonych liniach pomiarowych oraz konwergencja, czyli zaciskanie wyrobisk komorowych i chodnikowych.

W niniejszej pracy dość często stosowana jest fachowa terminologia, ściśle związana z funkcjonowaniem kopalni soli kamiennej, dlatego poniżej podano krótkie definicje tych zwrotów, które nie są oddzielnie wyjaśniane tekście:

- *Stropowa półka ochronna*: calizna solna pozostawiona ponad wyrobiskami najwyższych poziomów eksploatacyjnych w celu ograniczenia niekorzystnych wpływów pochodzących od eksploatacji na nadległy górotwór i powierzchnię;
- *Filarowo-komorowy system eksploatacji*: sposób eksploatacji złóż soli (w Polsce stosowany jedynie w kopalni w Kłodawie), polegający na tym, że sól wydobywana jest z szeregu równoległych do siebie komór oddzielonych odpowiedniej szerokości filarami podporowymi;
- *Pola eksploatacyjne kopalni*: rejon wydobywania soli, wydzielone ze względu na budowę geologiczną złoża;
- *Spąg półki ochronnej*: najniższy położony rejon półki (najwyższy poziom wydobywania);
- *Półki i filary międzykomorowe*: calizny skalne (solne), czyli pozostawione fragmenty złoża oddzielające wyrobiska eksploatacyjne na danym poziomie (filary) lub pomiędzy poziomami wydobywczymi (półki);
- *Wysad kłodawski*: złożo soli (o długości ok. 26 km i szerokości ok. 2 km), w centrum którego zlokalizowana jest Kopalnia Soli Kłodawa;
- *Okres cechstyński*: okres, w którym powstawały złoża soli na obecnych ziemiach polskich; miało to miejsce około 265 mln lat temu (późny perm);
- *Filar brzeżny*: calizna solna pozostawiona pomiędzy granicą wysadu (złożo solnego) a najbliższymi wyrobiskami górniczymi;
- *Ociosy*: ściany boczne wyrobisk (chodników, komór);
- *Odspojenia ociosów i stropów*: wynik działania naturalnych sił zaciskających przestrzeń wykonanego wyrobiska, tj. naruszonego górotworu;

- *Lutnie metalowe*: wieloelementowe rury służące do lokalnej wentylacji wyrobisk kopalnianych;
- *Calizna półki ochronnej*: fragment nienaruszonego robotami górniczymi górotworu pozostawionego nad wyrobiskami;
- *Przekop*: główny chodnik w kopalni.

## 2. Charakterystyka obiektu pomiaru

Obecnie Kopalnia Soli „Kłodawa” jest największym w kraju producentem soli kamiennej. Wydobycie prowadzi się tutaj tradycyjną metodą górniczą, która pozwala na zachowanie wszystkich walorów kłodawskiej soli. Solne produkty spożywcze uzyskuje się w zakładzie na drodze przeróbki mechanicznej bez dodawania jakichkolwiek substancji chemicznych. Stosuje się komorowy system eksploatacji, z pozostawieniem półek i filarów międzykomorowych. W pierwszych latach eksploatacji (lata 50-te XX wieku) wydobycie prowadzono na poziomach od 450 do 600 m; w chwili obecnej prace górnicze prowadzone są już nawet na poziomie 750 m. Zasoby znajdujące się w wysadzie do tej głębokości mogłyby zapewnić ekonomiczny byt kopalni na następne dziesiątki lat, gdyby nie wiele zagrożeń, jakie niesie ze sobą prowadzenie takiej eksploatacji. Są to m.in. zagrożenia metanowe, zagrożenia tąpnięciami oraz jedno z największych zagrożeń dotyczących kopalni soli - zagrożenie wodne [16].

W charakterystyce kłodawskiej kopalni warto również wspomnieć o otwartej w 2004 roku najgłębszej na świecie podziemnej trasie turystycznej. W programie zwiedzania przewidziano informację o historii powstania złóż kłodawskich pochodzących z okresu cechsztyńskiego. Następnie proponowany jest zjazd windą na poziom 600 m pod powierzchnię ziemi i przejście wyrobiskami korytarzowymi do solnej groty, gdzie znajduje się kaplica św. Kingi z jej solną rzeźbą. W trakcie zwiedzania istnieje możliwość podziwiania wyeksploatowanych komór, chodników i maszyn, używanych w podziemnym górnictwie solnym w przeszłości i współcześnie. Do niezwykle ważnych informacji dotyczących prezentowanej kopalni należy fakt, że w 2007 roku najstarsza jej część została wpisana do rejestru zabytków. Ciekawostką może być wydarzenie z 20 kwietnia 2007 roku, kiedy to Filharmonia Kaliska zagrała w podziemiach kłodawskiej kopalni koncert („Cztery pory roku” A. Vivaldiego) na głębokości 600 metrów, ustanawiając w ten sposób rekord Guinnessa [17].

Na terenach dzisiejszej kopalni jeszcze przed II wojną światową zostały wykonane badania grawimetryczne, które wykazały zalegające pod ziemią ogromne złoża soli kamiennej oraz soli magnezowo - potasowych. Badania wykonał profesor Edward Walery Janczewski, geolog i geofizyk, wykładowca Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Odkrył on istnienie ogromnej struktury solnej o długości ok. 26 km oraz szerokości ok. 2 km [17], co potwierdziły już pierwsze wiercenia wykonane w latach 1945 – 1950.

### 3. Analiza możliwości oraz warunków prowadzenia pomiarów geodezyjnych na terenie kopalni soli

Każda działalność człowieka naruszająca górotwór powoduje szereg zmian i deformacji zauważalnych zarówno wewnątrz górotworu, jak i na jego powierzchni oraz obiektach leżących w strefie wpływów wspomnianej aktywności. Składa się na to cały szereg procesów podlegających naturalnym prawom i zmieniającym do uzyskania równowagi wtórnej. Przed wystąpieniem gwałtownych rozprężeń górotworu pojawiają się z reguły okoliczności, które pozwalają przewidzieć wystąpienie niepożądanych skutków na powierzchni ziemi oraz w jej wnętrzu [9], [11]. Każdy górotwór (ogół skał tworzących skorupę ziemską) posiada inne właściwości geomechaniczne. Aby bezpiecznie prowadzić działalność górniczą należy jak najlepiej poznać jego właściwości, co wiąże się z ustaleniem zagrożeń, jakie niesie ze sobą eksploatacja górnicza danego złoża.

W nienaruszonym górotworze, pod ciężarem zalegających warstw powstają w skałach naprężenia o wartości proporcjonalnej do głębokości. Działalność górnicza powoduje powstanie dodatkowych naprężeń górotworu i równoczesne zaburzenie jego równowagi. Powstają wtedy siły działające w kierunku utworzonej w górotworze pustki, a noszą one ogólną nazwę „ciśnienia górotworu”. Ciśnienie to powoduje między innymi pęknięcie i odpajanie skał na powierzchniach wyrobiska i może prowadzić do jego uszkodzenia, a w skrajnych przypadkach do zniszczenia. Oddzielną dyscypliną naukową, która zajmuje się skutkami wywołanymi przez ciśnienie górotworu w wyrobiskach kopalnianych, jest mechanika górotworu [4].

Najistotniejszym zagrożeniem w kopalniach soli jest zagrożenie wodne, czyli możliwość wdarcia się do kopalni wód z otaczającego górotworu. Prowadzić mogą do tego wszelkie deformacje górotworu wpływające na powstanie lub udrożnienie kontaktu wód z otoczenia wysadu z podziemnymi wyrobiskami. Z tego właśnie względu ruch górotworu oraz powierzchni terenu należy stale monitorować wszelkimi dostępnymi sposobami. Istnieje szereg czynników, które mają wpływ na deformację górotworu w kopalniach soli, m.in.: wymiary komór, filarów i półek, rozpiętość kopalni w pionie i poziomie, sposób i tempo eksploatacji oraz okres istnienia pustek [6]. Jedną z metod minimalizowania ryzyka występowania zagrożeń w kopalniach soli jest pozostawianie w nich nad górnym poziomem 200 – 300-metrowej półki ochronnej i 50-metrowego filara brzeżnego.

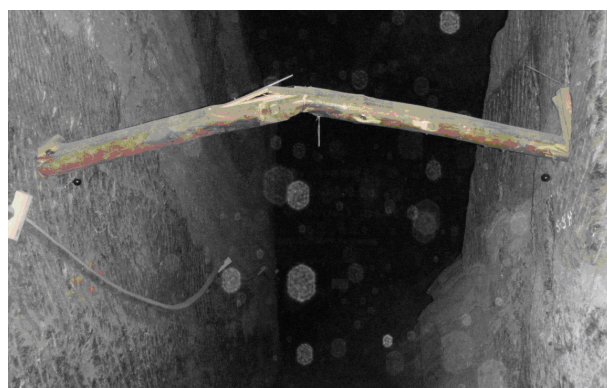
Przykłady historycznych katastrof w dwóch nieczynnych już polskich kopalniach soli – w Wapnie (k. Wągrowca) i Inowrocławiu [5, 6, 7], będących wynikiem długotrwałej i nieprzemyślanej eksploatacji oraz zignorowania naturalnych zagrożeń wodnych – pokazują jak wiele pracy powinno się włożyć w obsługę geologiczną – mierniczą (geodezyjną). Cykliczne badania i pomiary należy prowadzić przed rozpoczęciem eksploatacji, w trakcie jej trwania oraz po jej zakończeniu. Nadrzędnym celem jest dążenie do uniknięcia zagrożeń oraz zminimalizowania ich skutków.

Oprócz przemieszczeń pionowych i poziomych górotworu, w kopalniach występuje zjawisko konwergencji. W miernictwie górniczym termin ten oznacza proces zaciskania (zbiegania się) ociosów oraz spągu ze stropem wyrobiska. Zjawisko to spowodowane jest działaniem siły ciężkości, a w solnym górotworze decydujący wpływ na to mają takie parametry, jak wilgotność i temperatura. O jego rozwoju bądź nasileniu w głównej mierze decydują właściwości reologiczne skał – w tym wypadku soli (reologia to dziedzina nauki opisująca zachowanie ciał poddanych naprężeniom). Z pozostałych czynników, ważnych z punktu widzenia działania konwergencji, wymienić należy: głębokość wyrobiska, jego wymiary, pierwotny stan naprężenia oraz sposób prowadzenia robót górniczych. Zjawisko zaciskania w górotworze solnym przebiega w długim okresie czasu, jednak w początkowej fazie po utworzeniu pustki ma ono przebieg gwałtowny [8]. Przejawem występowania zjawiska konwergencji mogą być charakterystyczne odkształcenia krzywizn konturu wyrobiska, połamane i zmiażdżone belki obudowy chodników, sprasowany materiał skalny z obwałów lub wybrzuszone ścianki zamykające wejścia do komór (Rys. 1, 2).



Rys. 1. Efekt zaciskania pionowego pochylni w regionie wykonywania pomiarów

Fig. 1. Clamping vertical effect of a ramp in the area of measurement



Rys. 2. Przykład poziomego zaciskania ociosów wyrobiska

Fig. 2. Example of horizontal clamping of the excavated hollows

Zasady funkcjonowania zakładów górniczych reguluje wiele aktów prawnych, w tym te dotyczące sporządzania dokumentacji mierniczo – geologicznej. Nadrzędnym aktem jest *Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. - Prawo geologiczne i górnicze* [12], która określa m.in. zasady i warunki podejmowania, wykonywania oraz zakończenia działalności w zakresie wydobywania kopalin ze złóż. Ustawa podaje również wymagania w zakresie ochrony złóż, wód podziemnych oraz innych elementów środowiska naturalnego związanych z wykonywaniem prac górniczych. Aktem wykonawczym do tej ustawy jest *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 grudnia 2011 roku w sprawie dokumentacji mierniczo – geologicznej* [10]. Rozporządzenie to zawiera m.in. wiele szczegółów z zakresu tworzenia i edycji map wyrobisk górniczych, map sytuacyjno – wysokościowych w granicach terenu górniczego, profili otworów wiertniczych oraz przekrojów geologicznych. Z punktu widzenia służb geodezyjnych najważniejszym elementem tego rozporządzenia jest Załącznik nr 1 pt. *Szczegółowe wymagania dotyczące wykonywania prac geodezyjnych i geologicznych w celu sporządzenia, aktualizacji i uzupełnienia dokumentacji mierniczo – geologicznej*. Kluczową częścią Załącznika jest część III, traktująca o osnowach geodezyjnych na terenach kopalń, ich podziale, klasach dokładnościowych oraz metodach stabilizacji punktów. Znajduje się tam wiele zaleceń oraz informacji nt. pomiarów długości boków, kątów, różnic wysokości. Zawarte w Załączniku wytyczne i wskazówki mogą być niezwykle cenne, zarówno w trakcie przeprowadzania wspomnianych pomiarów w wyrobiskach kopalnianych, jak i podczas prac kameralnych, mających na celu właściwą analizę i interpretację uzyskanych danych pomiarowych.

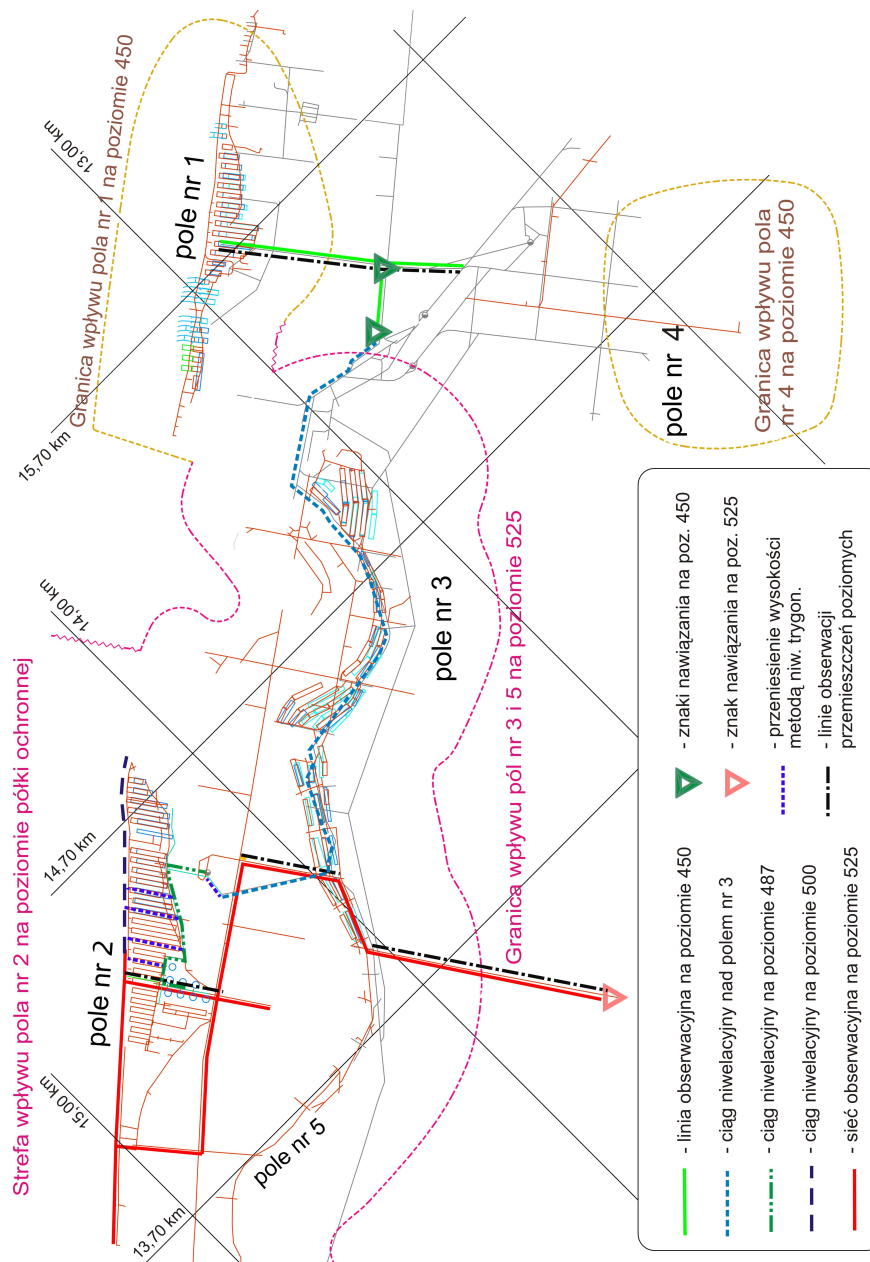
Przeprowadzenie właściwego pomiaru punktów sieci w podziemnej kopalni soli musi być poprzedzone pracami projektowymi odnośnie odpowiedniego rozmieszczenia punktów pomiarowych, tak aby możliwe było zaobserwowanie jak największej liczby zjawisk zachodzących wewnątrz górotworu. Prace projektowe wiążą się z dokładnym rozpoznaniem wyrobisk, komór i chodników, w których będą zastabilizowane punkty. Na tym etapie należy wziąć pod uwagę następujące, możliwe utrudnienia:

- duże prędkości przepływu powietrza w wyrobiskach położonych najbliżej szybów wentylacyjnych (brak możliwości spoziomowania niwelatora, niestabilność łąk niwelacyjnych);
- obwały i odspojenia ociosów i stropów (aż do stanu zwałowego) w niektórych przekopach;
- wypełnienie przekroju przekopów lutniami metalowymi lub innymi pozostałościami po działalności górniczej (brak możliwości instalacji znaków).

Pomiary niwelacyjne w podziemnych kopalniach sprawiają znacznie więcej trudności niż na powierzchni ziemi. Wiąże się to w głównej mierze z niedostatecznym oświetleniem oraz szybkim przepływem powietrza w rejonach szybów i tam wentylacyjnych.

Pierwsze pomiary niwelacyjne powierzchni terenu ponad kopalnią w Kłoda-wie pochodzą z 1952 roku (okres budowy kopalni) i odnoszą się do szczytkowej

sieci reperów nad centralnym rejonem pola nr 1 (Rys. 3). Wyniki pozwalają oszacować sumaryczne przemieszczenia pionowe tego rejonu od początku istnienia kopalni. Natomiast pierwsze pomiary niwelacyjne wnętrza górotworu rozpoczęto



Rys. 3. Schemat lokalizacji pól eksploatacyjnych oraz projekt linii pomiarowych

Fig. 3. Scheme of location of exploitation fields and design of measuring lines

w 1962 roku, głównie na liczącej kilkadziesiąt znaków sieci na poziomie 450 nad polem nr 1 oraz na krótszych ciągach niwelacyjnych na pozostałych poziomach. Obserwacje były jednak prowadzone nieregularnie; ujawniły się też problemy z trwałością znaków i sposobem stabilizacji. Stosunkowo najlepiej rozpoznane jest zjawisko naturalnego zaciskania pustek poeksploatacyjnych (dzięki systematycznym, trwającym przeszło 30 lat pomiarom wykonywanym przez OBR Chemkop [3]). Należy jednak nadmienić, że badania konwergencji dotyczą jedynie wybranych pionów w każdym z pól eksploatacji, a nie strefy pod półką ochronną. Aby ustalić wymaganą dokładność, a także częstotliwość pomiarów sieci, przeanalizowano dane pochodzące z powyższych źródeł oraz uwzględniono najnowsze, interesujące wyniki obserwacji linii pomiarowej nad polem nr 1, pochodzące z kilku ostatnich lat. Wyniki tych pomiarów pozwalają jednak na przybliżone określenie ruchów pionowych wnętrza górotworu:

- przemieszczenia pionowe w rejonie centrum niecki: około -3 mm/rok,
- przemieszczenia poziome w rejonie centrum niecki: około -5 mm/rok,
- przemieszczenia poziome nad krawędzią eksploatacji pola: około +6 mm/rok,
- przemieszczenia poziome na granicy i poza granicą oddziaływania eksploatacji: około  $\pm 2$  mm/rok.

Powyższe dane pozwalają oszacować wielkość spodziewanych deformacji oraz określić sposób obserwacji przemieszczeń znaków i baz w sieci. Ułatwiają również dobór odpowiedniego sprzętu pomiarowego z uwzględnieniem jego parametrów dokładnościowych oraz możliwości pracy w trudnych warunkach kopalnianych. Pokazane wartości osiadań są wielkościami znaczącymi, możliwymi do wyznaczenia metodą niwelacji technicznej (przy zastosowaniu odpowiedniego cyklu obserwacyjnego).

#### **4. Założenie kompleksowej sieci kontrolnej**

Sieć kontrolna zakładana w Kopalni Soli „Kłodawa” ma służyć do obserwacji deformacji stropowej półki ochronnej nad filarowo – komorowym górotworem. Większość znaków została zastabilizowana nad polem 2 (Rys. 3), gdyż tam zgromadzona jest zdecydowana większość objętości pustek kopalnianych, które są źródłem deformacji rozwijających się w otoczeniu pola i propagujących ku powierzchni terenu poprzez caliznę półki ochronnej.

Przed rozpoczęciem prac projektowych, a także w trakcie ich trwania, dokonywano systematycznego przeglądu wyrobisk, aby sprawdzić możliwość instalacji znaków oraz ocenić występujące utrudnienia odnośnie ich stabilizacji bądź wykonania pomiaru. Sytuacja taka miała miejsce na odcinku pomiędzy parą komór cylindrycznych a komorami prostopadłościennymi (nad centralnym rejonem pola numer 2), gdzie stwierdzono zasypanie urobkiem fragmentu przekopu (Rys. 4). Ze względu na przewidywane duże deformacje tego rejonu wyrobiska zdecydowano się na poszerzenie prześwitu przy stropie chodnika do około 1,5 metra. Rysunek 5 przedstawia przykład stabilizacji znaku spągowego, zabezpieczonego przykrywką z tworzywa sztucznego.





Rys. 4. Zasypany fragment przekopu

Fig. 4. An overwhelmed part of the excavation



Rys. 5. Spągowy znak pomiarowy z osłoną

Fig. 5. Floor measuring sign with cover

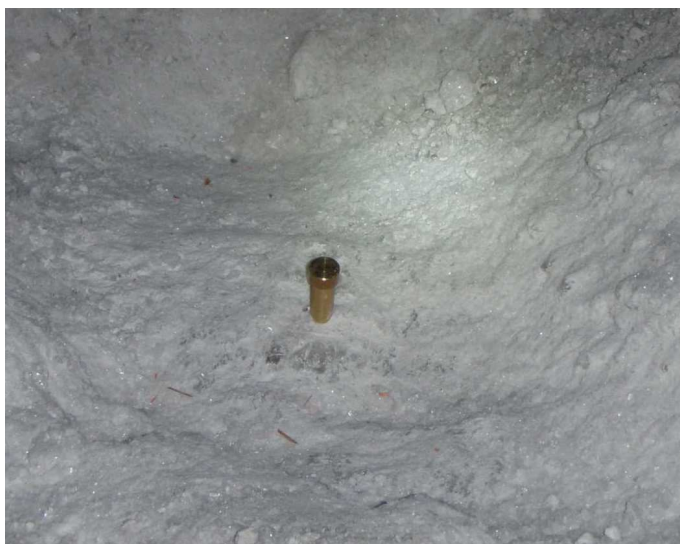
#### *Segment niwelacyjno-długościowy sieci kontrolnej*

W okresie od listopada 2013 do marca 2014 roku została wykonana instalacja znaków sieci i uzupełniające rozpoznanie wyrobisk dla realizacji opisywanego projektu. Wcześniejsze projekty stabilizacji z lat 2009/2010 zostały częściowo zmienione i zmodyfikowane, a część punktów sieci została wykorzystana i włączona do bieżących ciągów.

Otwory dla stabilizacji znaków o głębokościach od 0,3 – 0,7 m wykonywano w caliznach po usunięciu luźnych warstw na spągu. Pręty stalowe mocowano w otworach przy pomocy mikro-ładunków klejowych. Na końcówce pręta wprowadzonego do wyrobiska mocowany był właściwy znak pomiarowy w formie nierdzewnej nakrętki kołpakowej. Na znakach spągowych przewidzianych do pomiarów długości, nawiercono wcześniej otwórki o średnicy 1 mm (centr znaku). Wszystkie znaki spągowe zostały ponadto zabezpieczone za pomocą przykrywki z grubego tworzywa i przysypanie urobkiem – Rys. 5. Są one zupełnie niewidoczne w wyrobisku, co zabezpiecza je przed uszkodzeniem przez osoby postronne; odsłaniane są tylko na czas wykonywania pomiaru.

#### *Segment konwergencyjny sieci kontrolnej*

Instalacja pionowych baz konwergencyjnych przeprowadzona została pod koniec marca 2014 roku w wyrobiskach komorowych, położonych bezpośrednio pod ochronną półką stropową Kopalni Soli „Kłodawa” w polu numer 2. Znak spągowy w formie mosiężnego trzpienia osadzano przez wklejenie w otworze, wykonanym w litej caliznie solnej w rejonie geometrycznego środka komory (Rys. 6). Na stropie komory, ponad znakiem spągowym, mocowano specjalną tarczę sygnalizacyjną (Rys. 7). Bazy te zostały dostosowane do planowanego sposobu ich pomiaru - za pomocą dalmierza laserowego Disto. W trakcie przeprowadzanych prac napotkano na szereg trudności, gdyż znaczna liczba komór okazała się niedostępna (brak wejścia), bądź też warunki górnicze (stan wyrobiska) uniemożliwiały jej wykorzystanie do celów pomiarowych. Plan pomiaru przewiduje również zaniwelowanie znaków spągowych baz konwergencyjnych w nawiąza-



niu do najbliższego reperu w chodniku przyfilarowym. Ma to na celu między innymi określenie względnych przemieszczeń tych dwóch znaków w dłuższej perspektywie czasowej.

Rys. 6. Spągowy punkt bazy konwergencyjnej

Fig. 6. Floor point of convergence base



Rys. 7. Tarcza sygnalizacyjna zamocowana na caliźnie solnej

Fig. 7. Signal target mounted on salt rock

Założona sieć pomiarowa służy do obserwacji przemieszczeń pionowych, poziomych i konwergencji w wyrobiskach pod stropową półką ochronną – nad polami nr 2 i 3 (największe pustki poeksploatacyjne), a także nr 1 i częściowo nr 5. Punkty sieci pomiarowej stanowią narzędzie monitoringu deformacji w strefie górotworu kluczowej dla bezpieczeństwa kopalni. Kompleksowa sieć obserwacyjna liczy 46 znaków zainstalowanych w wyrobiskach chodnikowych na poziomach 450, 487, 500 i 525 (zob. Rys. 3). Uzupełnieniem sieci jest 17 baz pomiaru konwergencji pionowej, założonych w komorach najwyższych poziomów 475, 500, 525 i 550. Segment niwelacyjny sieci (łączna długość ciągów ponad 8 km), nawiązany jest w układzie lokalnym do węglbnych znaków nawiązania w wyrobiskach kopalni, położonych poza zasięgiem przewidywanych oddziaływań poeksploatacyjnych (na poziomach 450 i 525). Segment pomiarów długościowych (dla określenia przemieszczeń poziomych) stanowi 14 boków linii obserwacyjnych o łącznej długości ponad 2 km, prostopadłych do rozciągłości pól eksploatacji nr 1, 2, 3 i 5. Do nowopowstałej sieci włączono również szereg znaków już istniejących i wykorzystywanych we wcześniejszych pomiarach.

W ujęciu liczbowym charakterystykę założonej, kompleksowej sieci obserwacyjnej przedstawia tabela 1.

Pomiar niwelacyjny typowego znaku podwójnego, polegający na określeniu wysokości głowicy stropowej i spągowej, pozwoli na obliczenie średniej wysokości umownego znaku wirtualnego. Wyliczona wysokość tego znaku posiada tę właściwość, że nie będzie obciążona ruchem pionowym lokalnych caliżn, przy założeniu w miarę jednakowego wpływu obniżania stropu i wypiętrzania spągu. Założenie takie jest tym bardziej uzasadnione, że większość punktów obserwacyjnych sieci zlokalizowana jest w najstarszej, przystropowej części kopalni – w wyrobiskach kilkudziesięcioletnich, które przeszły już fazę intensywnej konwergencji.

Tabela 1. Charakterystyka sieci obserwacyjnej w Kopalni Soli "Kłodawa"

Table 1. Characteristics of the observation network in the Kłodawa Salt Mine

Cecha charakterystyczna sieci	Nowo założone	Istniejące
Liczba podwójnych znaków niwelacyjnych	38	8
Długość ciągów niwelacji geometrycznej	7400 m	900 m
Liczba boków pomiaru długości	9	5
Długość linii obserwacji przemieszczeń poziomych	1500 m	700 m
Liczba odcinków niwelacji trygonometrycznej	5	-
Liczba baz pomiaru konwergencji	9	8

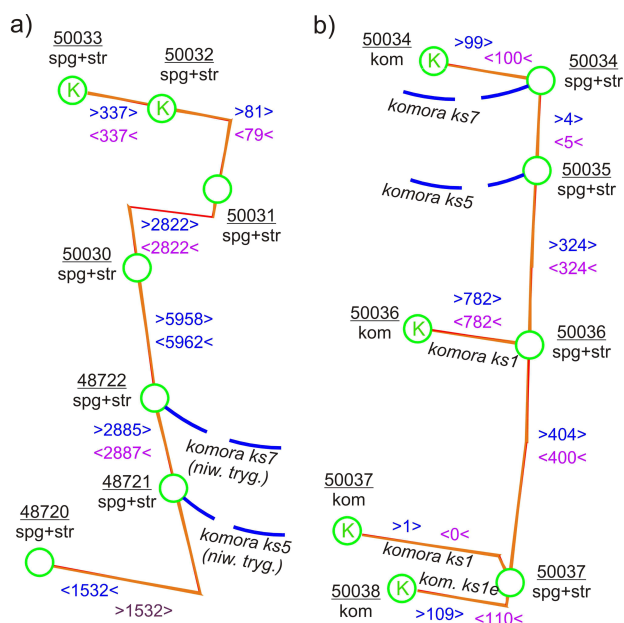
## 5. Pomiary wysokościowe

### *Pomiar metodą niwelacji geometrycznej*

Pomiary niwelacyjne wykonywano w Kopalni Soli „Kłodawa” w dniach od 7 lipca do 14 września 2014 roku. Do pomiarów użyto niwelator South DL – 202, składanych łąt kodowych z libelą oraz klasycznej żabki niwelacyjnej. Przed przystąpieniem do zasadniczej niwelacji punktów sieci dokonano kilku próbnych pomiarów na odcinkach testowych, aby przyjąć optymalne długości celowych oraz sposób oświetlania łąt. Zaznaczyć należy, że wszystkie pomiary prowadzone były w nieczynnych wyrobiskach górniczych kopalni, a więc pozbawionych zupełnie oświetlenia. Jedynym źródłem światła była typowa lampa górnicza, służąca do oświetlenia łąty i instrumentu. Po kilku wspomnianych pomiarach próbnych przyjęto zasadę, że długość celowej nie może przekraczać 40 metrów. Optymalne (i najczęściej stosowane) były celowe o długości około 35 metrów – nie spowalniały one pomiaru i pozwalały na zachowanie odpowiednich dokładności.

W trakcie prac pomiarowych niwelator ustawiony był na najwyższą możliwą precyzję odczytu (0,1 mm). Wykorzystano także funkcję uśredniania odczytów wielokrotnych (optymalnie ustawiono 4 odczyty). Właściwy pomiar rozpoczęto na odcinku pomiędzy wgłębnymi znakami nawiązania o numerach 45000 i 45001 na poziomie 450, których regularne obserwacje prowadzone są od 2006 roku. Użytkowano potwierdzenie ich wzajemnej stabilności, gdyż na przestrzeni blisko 8 lat, różnica ich wysokości zmieniała się w przedziale od 0 do 2,5 mm. Jako główny znak nawiązania sieci na poziomie 450 przyjęto reper nr 45000 – jest to punkt o głębokim posadowieniu (podobnie jak repery 45001 i 52550). Głębokość osadzenia takiego znaku (w litej caliznie solnej) wynosi ok. 3 m, co ma na celu niezawodne jego zespolenie z górotworem i uniknięcie zwiększonych przemieszczeń warstw bliskich konturowi wyrobiska. Wszystkie odcinki (na każdym z poziomów kopalni) zostały pomierzone metodą podwójnej niwelacji geometrycznej ze środka. Dla odcinków, na których uzyskana różnica przewyższeń z dwóch pomiarów była zbyt duża, wykonano trzeci pomiar kontrolny, tak aby zminimalizować ryzyko wystąpienia błędów. Sumaryczna długość ciągów niwelacji na poziomach 450,

487, 500 i 525 wyniosła 7980 m. Długość najkrótszego ciągu między wgłębnymi znakami nawiązania na poziomach 450 i 525 wynosi 5100 metrów. Przykładowe schematy pomiaru wraz z wynikami pokazano na rysunku 8. Na szkicach podano dla poszczególnych odcinków niwelacyjnych różnice wysokości (w [mm]) w kierunku głównym i powrotnym (np.  $>79>$ ;  $<81<$ ). Rozbieżności nie są duże (0–4 mm), nawet przy dużych przewyższeniach (np. na odcinku 50030 – 48722, Rys. 8a), co daje podstawę do pozytywnej oceny zastosowanej procedury pomiaru.



Rys. 8. Przykładowy szkic i wyniki pomiaru metodą niwelacji geometrycznej: a) na poziomie 487; b) na poziomie 500 (różnice wysokości podano w [mm])

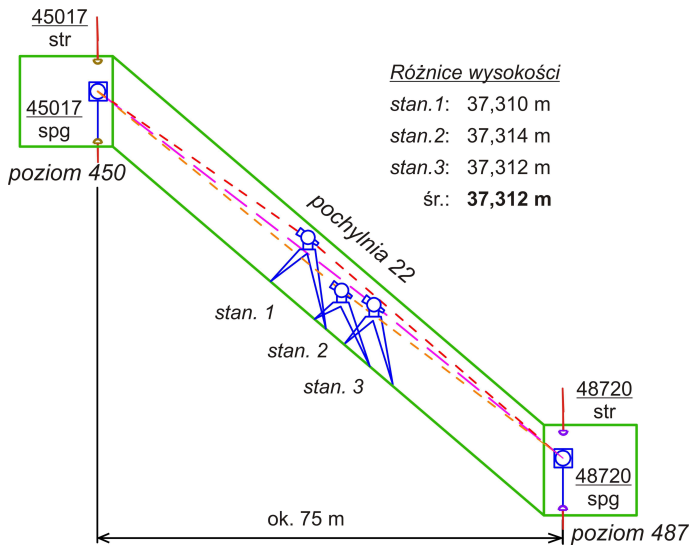
Fig. 8. Sample sketch and the results of measurement by direct leveling: a) at level 487; B) at level 500 (height differences are given in [mm])

#### Pomiar metodą niwelacji trygonometrycznej

W trakcie prac pomiarowych prowadzonych w kopalni w Kłodawie niwelacja trygonometryczna była jedyną możliwą metodą wyznaczenia różnic wysokości na kilku najtrudniejszych odcinkach. Pochylnie oraz komory solne to miejsca, gdzie klasyczna niwelacja geometryczna praktycznie była niewykonalna (przejścia między-poziomowe) lub bardzo utrudniona (średni kąt nachylenia pochylni: ok.  $30^\circ$ ). Przejścia z ciągiem wysokościowym przez komory i pochylnie wykonywane były w celu połączenia czterech niezależnych poziomów kopalni, czyli uzyskania kompleksowego zasięgu mierzonej sieci (Rys. 9, 10). Do prac pomiarowych wykorzystano tachimetr Elta R55, tarczę celowniczą umieszczaną na statywie oraz ruletkę.

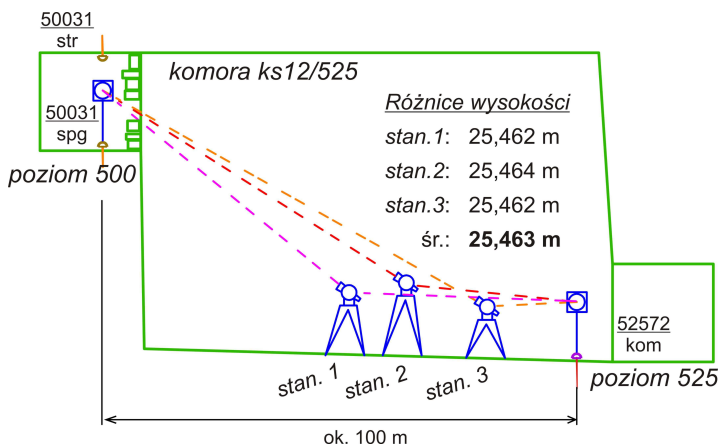


Na każdym z odcinków pomiar wykonywany był metodą ze środka, z trzech niezależnych stanowisk instrumentu. Pomiar przewyższeń odbywał się kilkakrotnie, w dwóch położeniach lunety. Dzięki temu uzyskano znaczną ilość niezależnych obserwacji, pozwalającą na wewnętrzną kontrolę dokładności pomiaru. Tarczę celowniczą ustawiano nad punktem sieci na statywie ze spodarką (centrowanie, poziomowanie) oraz domierzano wysokościowo. Łącznie pomiar tą metodą wykonano na pięciu przęsłach o długościach od 75 do 145 m i deniwelacjach od 8 do 38 m.



Rys. 9. Szkic i wyniki pomiaru metodą niwelacji trygonometrycznej w pochylni nr 22

Fig. 9. Sketch and measurement results by trigonometric leveling in the ramp No 22

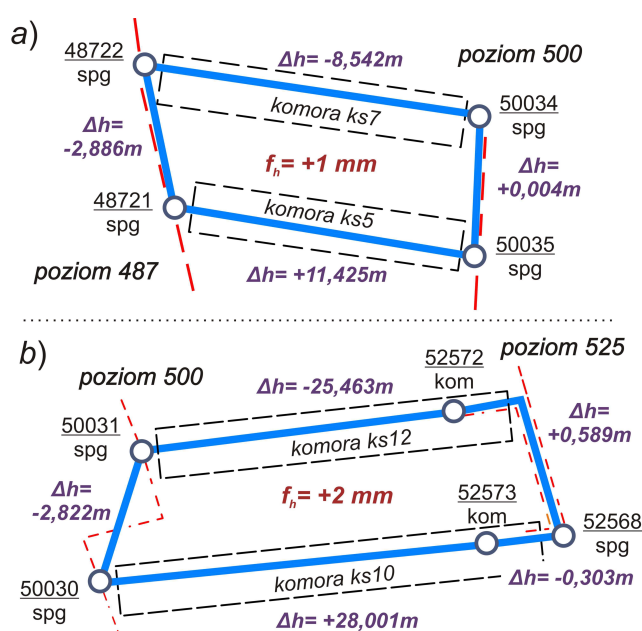


Rys. 10. Szkic i wyniki trygonometrycznego przeniesienia wysokości w komorze ks12/525

Fig. 10. Sketch and results of trigonometric transfer of height in the cave ks12 / 525

Rozbieżność uzyskanych wyników kilkukrotnego wyznaczenia różnicy wysokości metodą niwelacji trygonometrycznej (Rys. 9, 10) wynosi zaledwie od 0 do 4 mm, co przy przewyższeniach rzędu 30 metrów jest zadowalającym efektem zastosowania tej metody pomiaru wysokościowego w pochylniach i komorach poeksploatacyjnych.

Na rysunku 11 pokazano zamknięcia oczek wysokościowych, złożonych z odcinków niwelacji geometrycznej oraz trygonometrycznej. Minimalne odchyłki zamknięcia ( $1 \div 2$  mm) w oczkach, w których wykonywano przeniesienia wysokości, świadczą o staranności pomiaru i wewnętrznej spójności dokładnościowej sieci – pomimo stosowania dwóch różnych technik pomiaru niwelacyjnego.



Rys. 11. Odchyłki zamknięcia oczek w miejscach przeniesienia wysokości (przykłady a, b)

Fig. 11. Deviations of leveling mesh closure at height transfer locations (examples a, b)

## 6. Pomiar konwergencji wyrobisk oraz długości baz poziomych

Pomiar konwergencji wyrobisk prowadzony był od lipca do września 2014 roku przy wykorzystaniu dalmierza Disto-D5. Dodatkowo znaki spągowe baz konwergencyjnych na poziomach 500 i 525 zostały zaniwelowane do najbliższego reperu (w chodniku przyfilarowym). Do segmentu konwergencyjnego sieci włączono trzy istniejące już bazy w komorach ks1d/500, ks1e/500 i ks11/525. Łącznie pomiarem objęto 10 baz w 9 komorach leżących bezpośrednio pod stropową półką ochronną pola numer 2 (Rys. 3). Dodać należy, że dalmierz Disto-D5 był wyposażony podczas prac pomiarowych w specjalny uchwyt (Rys. 12), umożliwiający

jego precyzyjne mocowanie na spągowym punkcie pomiarowym oraz dokładne celowanie na tarczę umieszczoną w stropie komory. Dalmierz jest w tym przypadku zamocowany nieruchomo - podobnie jak instrument geodezyjny na statywie.

Poza długimi bazami (w komorach solnych) mierzonymi dalmierzem Disto, do baz konwergencyjnych zaliczyć można również podwójne znaki niwelacyjne (spąg – strop) w wyrobiskach chodnikowych. Zastosowana konstrukcja podwójnego znaku sieci niwelacyjnej pozwoli w kolejnych cyklach pomiarowych na wyznaczenie zaciskania pionowego chodników w miejscu stabilizacji znaków i określenie ewentualnych poprawek do rzędnej wysokościowej uzyskanej z niwelacji. Średnie długości chodnikowych baz pionowych wyznaczono na podstawie wielokrotnych obserwacji niwelacyjnych.

Pomiar długości boków osnowy (dla celów badania przemieszczeń poziomych) wykonany został przy użyciu tachimetru Elta R55, tarczy celowniczej mocowanej na statywie oraz pionu optycznego PZO. Pion wykorzystywany był w przypadkach pomiaru odległości poziomych pomiędzy punktami stropowymi sieci. Należało wtedy przy pomocy pionu zrzutować punkt stropowy na spąg i nad tak wyznaczonym punktem ustawić instrument bądź tarczę celowniczą (Rys. 13). Pomiar długości baz poziomych prowadzony był na poziomie 525. Każdy odcinek mierzony był dwukrotnie z obu końców przy niezależnym centrowaniu, po 3 odczyty odległości poziomej w każdym z dwóch położen lunety. Pomierzono ogółem 9 odcinków bazowych (zob. Rys. 3) o długościach od 102 do 214 m i łącznej długości ponad 1500 m.



Rys. 12. Dalmierz Disto-D5 w uchwycie zamocowany na znaku pomiarowym

Fig. 12. Disto-D5 in the holder mounted on the measurement mark



Rys. 13. Pomiar długości bazy tachimetrem

Fig. 13. Length measurement of the base line using a tachymeter



## 7. Analiza wyników pomiaru wysokościowego

Wielopoziomowy segment niwelacyjny sieci nawiązany jest w układzie lokalnym do dwóch wgłębnych znaków wysokościowych w wyrobiskach kopalni, położonych poza zasięgiem przewidywanych oddziaływań poeksploatacyjnych, na poziomach 450 i 525 (zob. Rys. 3). Różnica wysokości między tymi znakami nie była dotychczas znana; została określona dopiero w trakcie obecnego, pierwszego pomiaru. Zatem, do obliczenia wysokości znaków sieci w układzie lokalnym nie zastosowano procedury wyrównania ścisłego obserwacji, a jedynie wyznaczono poprawki wynikające z zamknięcia oczek niwelacyjnych. Odchyłkę zamknięcia dużego oczka niwelacyjnego na poziomie 525 rozrzuciono proporcjonalnie do liczby stanowisk na poszczególnych odcinkach. Natomiast odchyłki w oczkach między-poziomowych przypisano odcinkom niwelacji trygonometrycznej (ze względu na oczywistą, niższą dokładność tej metody) (por. Rys. 11).

Po rozrzuceniu odchyłek w oczkach niwelacyjnych obliczono wysokości znaków spągowych sieci w lokalnym układzie odniesienia, przyjmując dla znaku nawiązania 45000 wysokość umowną  $H_{45000} = 1000,000$  m. Podczas kolejnych cykli pomiarów okresowych sieci niwelacyjnej kluczowe znaczenie (przy interpretacji wyników) będzie miała stałość przyjętych znaków nawiązania na poziomach 450 (znak 45000) i 525 (znak 52550). Łączący je ciąg niwelacyjny o długości ok. 5,1 km mierzony był metodą niwelacji geometrycznej (w zdecydowanej przewadze) i uzupełniony dwoma odcinkami między-poziomowej niwelacji trygonometrycznej. Aby określić dokładność wyznaczenia różnicy wysokości ( $\Delta h$ ) między znakami nawiązania, wykorzystano wzór wynikający z prawa przenoszenia się błędów średnich [1]:

$$m_{\Delta h} = \sqrt{m_{geom}^2 + m_{tryg}^2} \quad (1)$$

gdzie:  $m_{\Delta h}$  – średni błąd wyznaczonej różnicy wysokości między znakami 45000 i 52550;

$m_{geom}$ ,  $m_{tryg}$  – średnie błędy składowych z niwelacji geometrycznej i trygonometrycznej (odpowiednio).

Dokładność pomiaru odcinka metodą niwelacji geometrycznej określono w następujący sposób:

$$m_{geom} = \sqrt{n \cdot (m_w^2 + m_p^2)} = 13,4 \text{ mm} \quad (2)$$

gdzie:  $m_w$ ,  $m_p$  – średnie błędy odczytu „wstecz” i „w przód” (przyjęto:  $m_w = m_p = 1$  mm);

$n$  – ilość stanowisk niwelatora w odcinku (przyjęto:  $n = 90$ ).

Dla dwóch odcinków między-poziomowych (pochylnia i komora), mierzonych metodą niwelacji trygonometrycznej, zastosowano wzór (por. [13]):

$$m_{tryg} = \sqrt{m_s^2 + D^2 \cdot \left(\frac{m_z}{\rho^{cc}}\right)^2 \cdot \cos^2 z + m_D^2 \cdot \operatorname{tg}^2 z} \quad (3)$$

gdzie:  $m_s$  – średni błąd wysokości sygnału (lustra; przyjęto: 2 mm);  
 $m_z$  – średni błąd pomiaru kąta pionowego  $z$  (przyjęto:  $15''$ );  
 $m_D$  – średni błąd pomiaru odległości zredukowanej  $D$  (przyjęto: 5 mm);  
 $\rho^{cc}$  – przelicznik pomiędzy miarą gradową a łukową kąta.

Wykorzystując rzeczywiste danych pomiarowe z pochylni 22 (*tryg1*) i komory ks10/525 (*tryg2*) obliczono błędy średnie pomiaru różnicy wysokości na tych odcinkach – odpowiednio, według wzoru (3):

- $m_{tryg1} = 5,2$  mm;
- $m_{tryg2} = 4,2$  mm.

Uwzględniając te wartości oraz wcześniej obliczony błąd niwelacji geometrycznej (2), uzyskano ostatecznie informację o dokładności wyznaczonej różnicy wysokości między znakami 45000 i 52550 – zgodnie z (1):

- $m_{\Delta h} \approx 15$  mm.

Wyliczona wartość błędu średniego wynika ze specyficznej, przestrzennej struktury sieci oraz zastosowanych metod pomiarowych (długość ciągu niwelacyjnego wynosi ponad 5 km, a różnica wysokości ok. 75 m). W kontekście funkcjonowania sieci jako narzędzia monitoringu deformacji poeksploatacyjnych, błąd ten może stanowić jeden ze wskaźników pozwalających określić stopień zaufania do rejestrowanych w przyszłości przemieszczeń pionowych.

## 8. Podsumowanie i wnioski

Przedmiotem niniejszej pracy była metodyka pomiaru specjalistycznej, wielosegmentowej sieci obserwacyjnej, pozwalającej na monitorowanie poeksploatacyjnych deformacji górotworu w rejonie stropowej półki ochronnej nad wyrobiskami Kopalni Soli „Kłodawa”. Rozległa sieć punktów obserwacyjnych obejmuje fragment górotworu pomiędzy poziomami 450 a 525 i pozwala rejestrować następujące przejawy jego deformacji:

- przemieszczenia pionowe pochodzące od pól eksploatacji nr 1, 2, 3 i częściowo 5,
- przemieszczenia poziome na liniach pomiarowych prostopadłych do rozciągłości pól nr 1, 2 i 3,
- zaciskanie pionowe wybranych komór pól nr 1 i 2 położonych bezpośrednio pod półką ochronną,
- zaciskanie pionowe chodników pól nr 1, 2 i 3 w strefie stropu eksploatacji.

Lokalne nawiązanie niwelacyjne sieci do znaków dołowych, położonych poza zasięgiem spodziewanych wpływów eksploatacyjnych, pozwala uniknąć pracochłonnego i kosztownego dowiązania do stałych znaków na powierzchni. Powtórne pomiary wykonane na istniejącym od 2006 roku fragmencie sieci na poziomie

450 nad polem nr 1 dowiodły słuszności tej tezy. Wgłębne znaki nawiązania o numerach 45000 i 45001 zachowują stabilność i będą mogły być wykorzystywane jako znaki nawiązania w przypadku kolejnej serii pomiarowej. Zastosowanie w konstrukcji sieci podwójnych znaków (spągowy oraz stropowy), lokalizowanych w środku przekroju chodnika, pozwala zminimalizować niedogodności pomiarowe i obliczeniowe, wynikające z procesu zaciskania chodnika. Linia obserwacji przemieszczeń poziomych została zlokalizowana nad centrum pola nr 2 i przedłużona poza pola nr 3 i 5, co pozwoli wyznaczyć wielkość tych przemieszczeń w newralgicznym rejonie centrum deformacji. Uzupełnieniem obserwacji zmian poeksploatacyjnych w skali globalnej całej kopalni (pól eksploatacyjnych) są lokalne pomiary konwergencji pionowej komór położonych bezpośrednio pod calizną półki ochronnej.

Zastosowane techniki pomiarów klasycznych są wystarczające do określenia ruchu przestrzennego punktu sieci z dokładnością na poziomie kilku do kilkunastu milimetrów, co przy odpowiednio dobranym interwale obserwacyjnym pozwoli na monitorowanie deformacji tej calizny ochronnej. Ustalenie poprawnego interwału obserwacyjnego wymaga wykonania kolejnego cyklu pomiarowego pełnej sieci po ok. 2 - 3 latach. Pozwoli to na określenie rzeczywistych wielkości przemieszczeń pionowych i poziomych, charakterystycznych dla przystropowej partii górotworu (obecnie słabo rozpoznanych).

Warunkiem skutecznego funkcjonowania założonej sieci obserwacyjnej jako narzędzia kontroli zjawisk deformacyjnych w strefie pod półką ochronną jest prowadzenie systematycznych, cyklicznych obserwacji w dłuższym okresie czasu. Wymaga to ochrony znaków sieci przed uszkodzeniem lub zniszczeniem oraz zapewnienia bezpiecznego dostępu do wyrobisk na czas wykonywania pomiarów.

## Literatura

- [1] Baran L.W.: Teoretyczne podstawy opracowania wyników pomiarów geodezyjnych, PWN, Warszawa 1999.
- [2] Bieniasz M.: Wykorzystanie współczesnych technik pomiarów geodezyjnych do wyznaczenia deformacji górotworu na przykładzie Kopalni soli „Kłodawa”. Praca magisterska, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, 2015.
- [3] Bieniasz J., Wojnar W.: Analiza porównawcza deformacji poeksploatacyjnych kłodawskiego systemu komorowo – filarowego przy pionowym i ukośnym układzie wyrobisk, OBR GS „CHEMKOP”, Kraków 2008.
- [4] Borecki M., Chudek M.: Mechanika górotworu, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1972.
- [5] Budryk W.: Zapadliska na terenie miasta Inowrocławia, Przegląd Górniczo – Hutniczy, Sosnowiec, nr 8, 1933, s. 431-444.
- [6] Kortas G. (red.): Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, PAN, Kraków 2008.
- [7] Ney R., Ślizowski K.: Kopalnia „Solno” poligonem doświadczalnym w skali cechsztyńskiego Zagłębia solnego Europy Wschodniej. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Kraków, t. 7, z. 4, 1991, s. 957-979.

- [8] Maj A.: Opracowanie modelu konwergencji wyrobisk w podziemnych kopalniach soli. Rozprawa doktorska. AGH Kraków 2009.
- [9] Pietruszka K.: Prognozowanie deformacji na terenach górniczych metodą badań modelowych (MES) weryfikowanych pomiarami geodezyjnymi, Warsztaty z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, PAN, Mat. Symp. 2002, s. 285-292.
- [10] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 grudnia 2011 r. w sprawie dokumentacji mierniczo – geologicznej, Dz. U. 2011, nr 291, poz. 1713.
- [11] Szpetkowski S.: Pomiary deformacji na terenach górniczych, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1978.
- [12] Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. - Prawo geologiczne i górnicze; Dz. U. 2011, nr 163, poz. 981.
- [13] Wytyczne techniczne G-4.3: Bezpośrednie pomiary wysokościowe. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa 1981.
- [14] [www.poznajpolske.onet.pl/](http://www.poznajpolske.onet.pl/) (dostęp: 21.08.2017).
- [15] [www.chemkop.pl/](http://www.chemkop.pl/) (dostęp: 21.08.2017).
- [16] [www.sol-klodawa.com.pl/](http://www.sol-klodawa.com.pl/) (dostęp: 21.08.2017).
- [17] [www.cluktur.pl/](http://www.cluktur.pl/) (dostęp: 21.08.2017).

## EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING GEODETIC MEASUREMENT TECHNIQUES TO DETERMINE THE DEFORMATION OF THE ROCK MASS IN THE KŁODAWA SALT MINE

### Summary

One of the aspects of the salt mine's functioning is the subsidence of the surface of the terrain and the part of the rock mass that is above the excavations. This process should be continuously monitored, i.a. by geodetic measurements. The aim of the paper is to show the possibility of using geodetic techniques to investigate the phenomenon of rock mass deformation in the area of exploitation of rock salt in the Kłodawa Salt Mine. The first stage of the work was the marking of the multifunctional observation network in excavations of the highest levels of the mine. Then the network was measured using several geodetic survey techniques. The final result of the work is the analysis of received measurement results in relation to archival data. The results of this analysis are to be used to determine the direction of actions aimed at ensuring the continued, safe and efficient exploitation of the Kłodawa salt dome.

**Keywords:** displacement, convergence, marking of benchmarks, leveling

*Przesłano do redakcji: 19.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Marek ŚLUSARSKI<sup>1</sup>  
Magdalena JURKIEWICZ<sup>2</sup>

## METODY POPRAWY PARAMETRÓW DOKŁADNOŚCIOWYCH DAWNYCH GEODEZYJNYCH OSNÓW POMIAROWYCH

Geodezyjne pomiary terenowe wykonywane w przeszłości podczas zakładania i aktualizacji ewidencji gruntów oparte były bezpośrednio na osnowach pomiarowych. Parametry dokładnościowe tych osnów są niższe w porównaniu ze współczesnymi osnowami pomiarowymi. Obecnie, archiwalne materiały Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego wykorzystywane są podczas wykonywania prac geodezyjnych dotyczących nieruchomości. W pracy przedstawiono i przeprowadzono ocenę trzech metod poprawy parametrów dokładnościowych dawnych osnów ewidencyjnych i pomiarowych. Metoda pierwsza (I) obejmuje transformację współrzędnych punktów dawnych osnów do obowiązującego układu współrzędnych na podstawie współrzędnych punktów dostosowania. Druga metoda (II) oparta jest na ścisłym wyrównaniu osnowy wraz z pomiarem uzupełniającym wybranych punktów w celu wzmocnienia sieci. Trzecia metoda (III) polega na inwentaryzacji i pomiarze wszystkich istniejących punktów dawnych osnów oraz ścisłym wyrównaniu sieci dla wyznaczenia współrzędnych punktów zniszczonych. Efektywność metod rewaloryzacji dawnych osnów oceniono na podstawie badań eksperymentalnych, w których wykorzystano dane z obiektów testowych. Satysfakcjonujące wyniki poprawy parametrów dokładnościowych osnów osiągnięto metodą „I” w tych przypadkach, w których stosunek liczby punktów dostosowania do ogólnej liczby badanych punktów wynosił ok. 1/3. Podobnie dla metody „III”, zadowalające wyniki można osiągnąć w przypadku wykorzystaniu ok. 30% punktów sieci jako dodatkowe punkty nawiązania. Natomiast w metodzie „II” dobre wyniki można osiągnąć, jeżeli odsetek odzyskanych punktów i wykorzystanych jako punkty nawiązania wynosi zaledwie ok. 10% wszystkich punktów sieci. Badając kompleksowe nakłady prac geodezyjnych (polowych i kameralnych) ustalono, że zarówno metoda „I” jak i metoda „II” rewaloryzacji osnów, charakteryzują się podobnymi kosztami.

**Słowa kluczowe:** modernizacja ewidencji gruntów i budynków, kataster, jakość danych przestrzennych

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Marek Ślusarski, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Geodezji, ul. Balicka 253a, 30-149 Kraków, tel. 12-662-45-11, rmslusar@cyfronet.pl

<sup>2</sup> Magdalena Jurkiewicz, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Geodezji, ul. Balicka 253a, 30-149 Kraków, tel. 12-662-45-11, jurkiewicz.m@o2.pl

## 1. Wprowadzenie

Ewidencja gruntów i budynków (EGiB) rozumiana jest jako rejestr urzędowy zapewniający gromadzenie, aktualizację oraz udostępnianie, w sposób jednolity dla całego kraju, informacji o gruntach, budynkach i lokalach, ich właścicielach oraz o innych podmiotach władających lub gospodarujących tymi gruntami, budynkami lub lokalami [1]. Kolejne zmiany przepisów prawnych zmierzają w kierunku utworzenia EGiB jako pełnowartościowego systemu rejestrującego dane o nieruchomościach. Realizowana na terenie całego kraju modernizacja baz ewidencji gruntów i budynków wpływa zasadniczo na stopniową poprawę jakości gromadzonych danych.

Dokładność położenia obiektów przestrzennych baz danych opisywana jest za pomocą dwóch atrybutów: źródło danych oraz błąd położenia. Dla działek ewidencyjnych numeryczny opis ich granic powinien być realizowany za pomocą punktów granicznych, których położenie względem osnowy geodezyjnej I klasy zostało określone na podstawie geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych z błędem średnim nie przekraczającym 0,30 m [2]. Zapis ten wyklucza możliwość stosowania do tworzenia numerycznego opisu granic działek ewidencyjnych, innych technik niż pomiary geodezyjne. Jednak przy wykonywaniu modernizacji EGiB oraz przy realizacji typowych prac geodezyjnych dotyczących nieruchomości (podziały, rozgraniczenia) obligatoryjnie należy wykorzystywać archiwalne materiały Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego.

Geodezyjne pomiary terenowe wykonywane podczas zakładania i aktualizacji ewidencji gruntów oparte były bezpośrednio na osnowach ewidencyjnych i pomiarowych [3], [4]. Osnowy ewidencyjne zakładano w formie wielorzędowych ciągów poligonowych oraz wielorzędowych linii pomiarowych. Osnowy te charakteryzują się niskimi parametrami dokładnościowymi, których źródłem były [5]:

- niewspółmiernie niższa precyzja pomiarów kątowno – liniowych w stosunku do współczesnych technik pomiarowych,
- niska dokładność oraz mała liczba punktów nawiązania,
- wielorzędowość sieci będącą rezultatem ograniczeń ówczesnych technik obliczeniowych oraz różnych przedziałów czasowych, w których były realizowane prace geodezyjne,
- przybliżone metody wyrównania sieci.

Osnowy pomiarowe zakładane w latach 80. i 90. XX wieku charakteryzowały się wyższą dokładnością w stosunku do osnow ewidencyjnych. Zgodnie z zapisami określonymi w Instrukcji technicznej G-4 [6], punkty osnowy pomiarowej należało wyznaczyć z błędem położenia nie większym od 0,20 m, a dla terenów rolnych i leśnych – nie większym od 0,50 m. Jednakże parametry dokładnościowe tych osnow są również niższe w porównaniu ze współczesnymi osnowami pomiarowymi. Głównymi przyczynami takiego stanu są [5]:

- niższa precyzja pomiarów liniowych w odniesieniu do współczesnych technik pomiarowych,

- dwurzędowość sieci będącą rezultatem ograniczeń ówczesnych technik obliczeniowych,
- przybliżone techniki wyrównania sieci.

Osnowy ewidencyjne i pomiarowe stanowiły podstawę nawiązania dla pomiarów punktów granicznych wykonywanych głównie metodą ortogonalną. W związku z tym można określić średni błąd położenia punktu granicznego, na który wpływają błędy średnie technik pomiarowych oraz osnów nawiązania. Dla pomiarów ortogonalnych, nawiązywanych do osnów geodezyjnych – zgodnie z zasadami określonymi w Instrukcji technicznej G-4 [6] – można założyć, że błąd średni położenia punktu granicznego względem osnowy geodezyjnej I klasy nie będzie większy niż  $\pm 0,33$  m, zgodnie z formułą:

$$m_{Pmax} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2 + m_6^2} = 0,33 \text{ m} \quad (1)$$

gdzie:  $m_1 = 0,10$  m – błąd średni pomiaru metodą ortogonalną,

$m_2 = 0,15$  m – błąd średni linii pomiarowej II rzędu,

$m_3 = 0,15$  m – błąd średni linii pomiarowej I rzędu.

$m_4 = 0,20$  m – błąd średni osnowy pomiarowej,

$m_5 = 0,10$  m – błąd średni osnowy III klasy,

$m_6 = 0,05$  m – błąd średni osnowy II klasy.

Na podstawie modelu kompozycji błędów występujących przy pomiarach metodą ortogonalną (1), można szacować, że dla pewnej grupy punktów granicznych dopuszczalna wartość błędu średniego (0,30 m) będzie przekroczona. Z tego powodu, archiwalne operaty techniczne zawierające dane dotyczące geodezyjnych pomiarów granic działek ewidencyjnych, będą mogły być wykorzystane w ograniczonym zakresie. Dla prac geodezyjnych, gdzie wykorzystywane są materiały archiwalne, kluczowe znaczenia ma metodyka poprawy parametrów dokładnościowych dawnych osnów pomiarowych.

## 2. Proponowane metody rewaloryzacji dawnych osnów

Dawne osnowy ewidencyjne i pomiarowe charakteryzują się niską dokładnością oraz brakiem jednorodności. Przywrócenie dawnej wartości tym sieciom geodezyjnym wymaga zastosowania kilku podejść, przy realizacji których należy wykonać nowe pomiary dla części punktów oraz przeprowadzić ponowne wyrównanie osnów i transformację współrzędnych. Na podstawie własnych doświadczeń autorów pracy oraz przeprowadzonych prac badawczych z zakresu oceny jakości danych urzędowych baz przestrzennych, zdefiniowano zbiór trzech metod poprawy parametrów dokładnościowych dawnych osnów.

Metoda pierwsza oznaczona symbolem „I”, obejmuje transformację współrzędnych punktów dawnych osnów do obowiązującego układu współrzędnych. Druga metoda (II), oparta jest na ścisłym wyrównaniu osnowy wraz z pomiarem

uzupełniającym wybranych punktów w celu wzmocnienia sieci. Trzecia metoda (III) polega na inwentaryzacji i pomiarze wszystkich istniejących punktów dawnych osnów oraz ścisłym wyrównaniu sieci dla wyznaczenia współrzędnych punktów zniszczonych.

Realizacja zamierzonego celu – poprawy parametrów dokładnościowych dawnych osnów – zostanie osiągnięta w wyniku przeprowadzenia geodezyjnych prac pomiarowych i obliczeniowych, szczegółowo zdefiniowanych w zakresach każdej z metod.

Dla metody (I) o nazwie „Transformacja współrzędnych punktów dawnych osnów do obowiązującego układu współrzędnych”, określono cztery etapy postępowania:

- 1) pomiar (wybranych) istniejących w terenie punktów dawnych osnów techniką RTN GNSS oraz metodą biegunową;
- 2) obliczenie współrzędnych pomierzonych punktów;
- 3) obliczenie parametrów transformacji z układu pierwotnego do układu „2000”, na podstawie istniejących w terenie punktów osnowy jako punktów dostosowania;
- 4) transformacja współrzędnych punktów badanego obiektu z układu pierwotnego do układu „2000” z uwzględnieniem korekt Hausbrandta.

Dla metody (II) o nazwie „Ścisłe wyrównanie osnowy z pomiarem uzupełniającym w celu wzmocnienia sieci”, określono osiem etapów postępowania:

- 1) utworzenie na podstawie operatów źródłowych (archiwalnych) zbiorów obserwacji kątowych i liniowych;
- 2) wyrównanie metodą pośredniczącą sieci osnowy w układzie „2000” w nawiązaniu do obecnej osnowy geodezyjnej;
- 3) analiza wyników wyrównania; wybór punktów i obserwacji, które nie spełniają wymogów dokładnościowych, na podstawie błędu położenia oraz poprawek do kątów i odległości;
- 4) wybór punktów sieci, które nie spełniają wymogów dokładnościowych w celu ich odszukania w terenie i wykonania pomiarów uzupełniających;
- 5) pomiar istniejących w terenie punktów sieci techniką RTN GNSS oraz metodą biegunową;
- 6) obliczenie współrzędnych pomierzonych punktów;
- 7) ponowne wyrównanie dawnej osnowy z założeniem błędności pomierzonych punktów nawiązania, na podstawie błędów średnich ich współrzędnych (X i Y);
- 8) analiza wyników wyrównania; w przypadku występowania w sieci punktów nie spełniających wymogów dokładnościowych – wykonanie dodatkowego pomiaru uzupełniającego; ostatecznie wyłączenie z sieci ciągów poligonowych nie spełniających parametrów dokładnościowych.

Dla metody (III) „Inwentaryzacja i pomiar wszystkich istniejących punktów dawnych osnów”, określono pięć etapów postępowania:

- 1) odszukanie w terenie wszystkich istniejących punktów osnowy na podstawie miar źródłowych (kąty i odległości) oraz współrzędnych tych punktów z zasobu geodezyjnego;



- 2) pomiar istniejących w terenie punktów dawnych osnów techniką RTN GNSS oraz metodą biegunową;
- 3) obliczenie współrzędnych odszukanych i pomierzonych punktów;
- 4) zestawienie punktów nieodszukanych;
- 5) utworzenie na podstawie operatów źródłowych (archiwalnych) zbiorów obserwacji kątowych i liniowych dla zniszczonych punktów;
- 6) wyrównanie metodą pośredniczącą sieci punktów zniszczonych (w układzie „2000”) w nawiązaniu do osnowy geodezyjnej oraz do pomierzonych punktów, z założeniem błędności punktów nawiązania na podstawie ich błędów średnich dla współrzędnych X i Y.

Rewaloryzacja parametrów dokładnościowych dawnych osnów może zostać zrealizowana w wyniku przeprowadzenia dodatkowych geodezyjnych prac pomiarowych i obliczeniowych. Wielkość i zakres tych prac będzie różny w zależności od jakości wykorzystywanych materiałów archiwalnych oraz od zastosowanej metody postępowania. Dla celów oceny skuteczności poprawy parametrów dokładnościowych dawnych osnów ewidencyjnych i pomiarowych za pomocą proponowanych trzech metod, wykonano badania eksperymentalne. Analizowano trzy obiekty testowe położone na terenie gminy Olkusz (woj. małopolskie). Badane osnowy pochodzą z trzech różnych obrębów ewidencyjnych. Osnowy te zakładane były w latach 60. i 70. XX wieku dla prac geodezyjnych wykonywanych przy tworzeniu i aktualizacji mapy zasadniczej i mapy ewidencyjnej. Powiatowy Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej posiada w zasobie wykazy współrzędnych punktów osnów w układach „1965” i „2000”. W Zasobie Geodezyjnym istnieją również archiwalne operaty techniczne zawierające dane pomiarowe, pozwalające obliczyć współrzędne punktów osnów pomiarowych.

W pracy [5] przedstawiono wyniki eksperymentalnej oceny parametrów dokładnościowych analizowanych obecnie dawnych osnów ewidencyjnych i pomiarowych. Dla obiektu testowego oznaczonego symbolem „A” badano 230 punktów, dla obiektu „B” – 207 punktów, a dla obiektu „C” – 185 punktów. W wyniku wykonanych prac pomiarowych zinwentaryzowano 75 punktów na terenie obiektu „A”, 83 na „B” oraz 56 na „C”, co stanowi odpowiednio 33%, 40% i 30% wszystkich punktów (tab. 1). Położenie odszukanych punktów wyznaczono na podstawie wyników pomiarów metodą tachimetryczną oraz techniką precyzyjnego pozycjonowania GNSS. Położenie tych punktów określono względem osnowy geodezyjnej z dokładnością nie przekraczającą  $\pm 0,03$  m. Szacowaną dokładność położenia punktów badanych osnów wyznaczono na podstawie wektorów przesunięcia punktów próby badawczej (odszukane punkty osnowy) względem ich położenia uznanego za bezbłędne (wyznaczone wartości współrzędnych). Wstępna ocena dokładności badanych osnów pomiarowych pokazuje, że dokładność geometryczna punktów tych osnów zawiera się w przedziale od  $\pm 0,34$  m do  $\pm 0,46$  m (tab. 1). Wymagane dokładności ( $\mu \leq 0,20$  m) spełnia tylko od 12% do 16% badanych punktów.

Tabela 1. Podstawowe statystyki badanych osnów

Table 1. Basic statistics of investigated networks

Statystyka	Symbol obiektu		
	„A”	„B”	„C”
Liczba punktów dawnej osnowy	230	207	185
Liczba i odsetek odszukanych w terenie punktów osnowy	75 / 33%	83 / 40%	56 / 30%
Szacowana dokładność – wartość przeciętna ( $\mu$ ) [m]	0,41	0,46	0,34
Odsetek punktów, dla których $\mu \leq 0,20$ m	12%	10%	16%

W związku z powyższym można wnioskować, że dla ponad 80% punktów granicznych ich błędy położenia mogą przekroczyć graniczną wielkość 0,30 m względem osnowy geodezyjnej 1 klasy. Globalna poprawa parametrów dokładnościowych punktów granicznych może być osiągnięta poprzez rewaloryzację tych osnów, które były podstawą wykonywania pomiarów geodezyjnych.

### 3. Wyniki i dyskusja

Przyjmując założenie, że błąd położenia punktu granicznego nie może przekroczyć wartości dopuszczalnej, graniczny błąd położenia punktu osnowy pomiarowej (względem osnowy geodezyjnej 1 klasy), można wyznaczyć według wzoru:

$$m_{OSNOWAmax} = \sqrt{m_{Pmax}^2 - m_1^2 - m_2^2 - m_3^2} \quad (2)$$

Zakładając, że  $m_{Pmax} = 0,30$  m oraz przyjmując wartości współczynników  $m_1$ ,  $m_2$  i  $m_3$  na podstawie wzoru (1), uzyskujemy wartość  $m_{OSNOWAmax} = 0,19$  m. W związku z powyższym, wyniki dotyczące metod rewaloryzacji dawnych osnów odnieszono do wartości wyznaczonego granicznego błędu położenia punktu osnowy.

Pierwsza analizowana metoda („I”), oparta jest na transformacji współrzędnych punktów dawnych osnów do obowiązującego układu współrzędnych na podstawie współrzędnych punktów dostosowania. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano odszukane i pomierzone punkty dawnych osnów (tab. 2). Zastosowano transformację konforemną pierwszego stopnia z poprawkami post-transformacyjnymi Hausbrandta [7]. Lokalne układy współrzędnych realizowane były poprzez osnowy i pomiary geodezyjne jako układy konforemne (nie wprowadzono poprawek do kątów). Transformacja konforemna zachowuje lokalny kształt figur z układu pierwotnego [8].

W procesie transformacji współrzędnych wykorzystano odpowiednio dobrane zbiory punktów dostosowania. Odsetek tych punktów w ogólnej liczbie badanych punktów wynosił kolejno: ok. 10%, 30% i 50%. Zadawalające wyniki

( $\mu \approx 0,20$  m) poprawy parametrów dokładnościowych osnów w procesie transformacji współrzędnych osiągnięto w przypadkach, w których stosunek liczby punktów dostosowania do ogólnej liczby badanych punktów wynosił ok. 1/3 (tab. 2). Graniczna wartość przeciętna położenia punktów ( $\mu \leq 0,19$  m) badanych osnów nie zostanie przekroczona w przypadkach, w których odsetek punktów dostosowania w ogólnej liczbie badanych punktów wynosił ok. 50% (tab. 2).

Tabela 2. Szacowana dokładność osnów w procesie transformacji współrzędnych (metoda I)

Table 2. Estimated accuracy of networks in the process of coordinates transformation (method I)

Statystyka	Symbol obiektu		
	„A”	„B”	„C”
Liczba badanych punktów osnowy	75	83	56
Liczba i odsetek punktów dostosowania	10 / 13%	11 / 13%	7 / 12%
Szacowana dokładność – wartość przeciętna ( $\mu$ ) [m]	0,37	0,39	0,29
Liczba i odsetek punktów dostosowania	23 / 31%	25 / 30%	17 / 30%
Szacowana dokładność – wartość przeciętna ( $\mu$ ) [m]	0,20	0,23	0,18
Liczba i odsetek punktów dostosowania	36 / 48%	41 / 49%	28 / 50%
Szacowana dokładność – wartość przeciętna ( $\mu$ ) [m]	0,16	0,18	0,14

Druga analizowana metoda („II”), oparta jest na ścisłym wyrównaniu osnowy z pomiarem uzupełniającym, którego celem jest wzmocnienie sieci. W badaniach eksperymentalnych – w pierwszym etapie – wyznaczono współrzędne punktów badanych osnów na podstawie archiwalnych materiałów źródłowych. Wyniki wyrównania (tab. 3) pokazują, że średnia dokładność ( $m_p$ ) położenia punktów tych osnów zawiera się w przedziale od 0,30 m do 0,43 m (tab. 3). Wymagane dokładności ( $m_p \leq 0,19$  m) nie zostały spełnione dla żadnego z analizowanych obiektów.

Tabela 3. Początkowe charakterystyki liczbowe i dokładnościowe osnów (metoda II)

Table 3. Initial numerical and accuracy characteristics of networks (method II)

Parametr	Symbol obiektu			
	„A”	„B”	„C”	
Liczba badanych punktów osnowy	230	207	185	
Liczba punktów nawiązania (osnowa geodezyjna)	29	21	25	
Liczba obserwacji	liniowych	240	221	195
	kątowych	266	242	211
Błąd położenia punktu [m]	przeciętny ( $m_p$ )	0,37	0,43	0,30
	maksymalny ( $m_{max}$ )	0,58	0,68	0,51

W drugim etapie realizacji tej metody („II”) badane sieci wzmocniono dodatkowymi punktami nawiązania, pochodzącymi z tych osnów. Odsetek dodatkowych punktów nawiązania w ogólnej liczbie badanych punktów wynosił ok. 10% (tab. 4). Wyniki ponownego wyrównania (tab. 4) pokazują, że przeciętny błąd ( $m_p$ ) położenia punktów badanych osnów zawiera się w przedziale od 0,15 m do 0,20 m, a błąd maksymalny w przedziale od 0,22 m do 0,29 m. Błąd położenia dla punktów badanych osnów nie przekroczy, z prawdopodobieństwem  $P = 0,90$ , wartości granicznej  $m_{OSNOWAmax} = 0,19$  m.

Tabela 4. Wynikowe charakterystyki liczbowe i dokładnościowe osnów (metoda II)

Table 4. Resulting numerical and accuracy characteristics of networks (method II)

Parametr	Symbol obiektu		
	„A”	„B”	„C”
Liczba wyznaczanych punktów osnowy	211	181	168
Liczba dodatkowych punktów nawiązania oraz odsetek badanych punktów	19 / 8%	26 / 12%	17 / 9%
Błąd położenia punktu [m]	przeciętny ( $m_p$ )	0,18	0,20
	maksymalny ( $m_{max}$ )	0,26	0,29
Liczba i odsetek punktów dla których $m_p \leq 0,19$ m	193 / 91%	163 / 90%	160 / 95%

Trzecia analizowana metoda („III”), oparta jest na inwentaryzacji i pomiarze wszystkich istniejących punktów dawnych osnów. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano odszukane i pomierzone punkty dawnych osnów, których odsetek w ogólnej liczbie badanych punktów wynosił ok. 30% (tab. 5). Wyniki ścisłego wyrównania pokazują, że przeciętny błąd ( $m_p$ ) położenia dla punktów badanych osnów zawiera się w przedziale od 0,11 m do 0,17 m, a błąd maksymalny w przedziale od 0,18 m do 0,25 m (tab. 5). Błąd położenia dla punktów badanych osnów nie przekroczy, z prawdopodobieństwem  $P = 0,95$ , wartości granicznej  $m_{OSNOWAmax} = 0,19$  m.

Tabela 5. Charakterystyki liczbowe i dokładnościowe osnów (metoda III)

Table 5. Numerical and accuracy characteristics of networks (method III)

Parametr	Symbol obiektu		
	„A”	„B”	„C”
Liczba badanych punktów osnowy	230	207	185
Liczba punktów nawiązania (osnowa geodezyjna)	29	21	25
Liczba dodatkowych punktów nawiązania oraz odsetek badanych punktów	65 / 28%	71 / 34%	55 / 30%
Liczba wyznaczanych punktów osnowy	165	136	130
Błąd położenia punktu [m]	przeciętny ( $m_p$ )	0,14	0,17
	maksymalny ( $m_{max}$ )	0,23	0,25
Liczba i odsetek punktów dla których $m_p \leq 0,19$ m	158 / 96%	129 / 95%	130 / 100%

Zadowolające wyniki poprawy parametrów dokładnościowych badanych osnów osiągnięto, dla każdej z trzech analizowanych metod postępowania. Realizacja zamierzonego celu – rewaloryzacja dawnych osnów – została uzyskana w wyniku przeprowadzenia dodatkowych geodezyjnych prac pomiarowych i obliczeniowych. Zakres tych prac determinował będzie efektywność proponowanych metod rewaloryzacji osnów.

Wymierne wyniki poprawy parametrów dokładnościowych osnów osiągnięto metodą „I” (transformacja współrzędnych), w tych przypadkach, w których stosunek liczby punktów dostosowania do ogólnej liczby badanych punktów wynosił ok. 1/3. Podobnie dla metody „III” (inventaryzacja i pomiar wszystkich odszukanych punktów), zadowolające wyniki można osiągnąć w przypadku wykorzystaniu ok. 30% punktów sieci jako dodatkowe punkty nawiązania. Natomiast w metodzie „II” (ściśle wyrównaniu osnowy z pomiarem uzupełniającym) dobre wyniki można osiągnąć wówczas, gdy odsetek odszukanych punktów i wykorzystanych jako punkty nawiązania wynosi zaledwie ok. 10% wszystkich punktów sieci.

#### 4. Wnioski

Archiwalne materiały Państwowego Zasobu Geodezyjnego i Kartograficznego można wykorzystywać tylko w ograniczonym zakresie podczas wykonywania prac geodezyjnych dotyczących nieruchomości (podziały, rozgraniczenia, modernizacja ewidencji gruntów). Widoczny wzrost wielkości wykorzystywanych danych archiwalnych można uzyskać poprzez rewaloryzację dawnych osnów ewidencyjnych i pomiarowych. Poprawa parametrów dokładnościowych tych osnów zostanie osiągnięta poprzez zastosowanie jednego z trzech podejść: transformacji współrzędnych punktów dawnej osnowy na podstawie współrzędnych punktów dostosowania; ściślego wyrównania osnowy z pomiarem uzupełniającym, którego celem jest wzmocnienie sieci; inventaryzacji i pomiaru wszystkich istniejących punktów dawnych osnów.

Analizując efektywność proponowanych metod rewaloryzacji osnów, stwierdzono, że metoda „II” wymaga najmniejszych nakładów pracy związanych z inventaryzacją i pomiarem dodatkowych punktów sieci wykorzystywanych w procesie ściślego wyrównania jako punkty nawiązania. Jednak w metodzie tej dodatkowo należy przygotować zbiory obserwacji kątowych i liniowych na podstawie źródłowych operatów technicznych. Badając kompleksowe nakłady prac geodezyjnych (polowych i kameralnych) ustalono, że zarówno metoda „I” jak i metoda „II” rewaloryzacji osnów, charakteryzują się podobnymi kosztami.

#### Literatura

- [1] Ustawa Prawo geodezyjne i kartograficzne z dnia 17 maja 1989 r. (Dz. U. z 2015 r., poz. 520 z późn. zm.).

- [2] Rozporządzenie Ministra Rozwoju Regionalnego i Budownictwa z dnia 29 marca 2001 r. w sprawie ewidencji gruntów i budynków (Dz.U. Nr 38, poz. 454, z późn. zm.).
- [3] Instrukcja techniczna B-III. Poligonizacja techniczna, GUGiK, Warszawa 1965.
- [4] Surowiec S. (red): Ewidencja gruntów, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1987.
- [5] Ślusarski M., Justyniak N.: Experimental evaluation of the accuracy parameters of former surveying networks. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Nr II (2), 2017, pp. 825-835.
- [6] Instrukcji technicznej G-4. Pomiary sytuacyjne i wysokościowe, GUGiK, Warszawa 1983.
- [7] Wysocki P. Transformacje osnów pomiarowych. Zastosowanie transformacji w procesie odnowienia osnowy pomiarowej podczas modernizacji zbiorów zintegrowanego systemu informacji o nieruchomościach, Wydawnictwo I-NET.pl, Olsztyn 2011.
- [8] Kadaj R., Zasady transformacji współrzędnych pomiędzy różnymi układami kartograficznymi na obszarze Polski (4). *Osnowy a układy.*, *Geodeta* nr 12(67), 2000. s. 28-32.

## METHODS FOR IMPROVING THE ACCURACY PARAMETERS OF FORMER GEODETIC MEASUREMENT NETWORKS

### Summary

Geodetic field measurements performed during the establishment and updating of land registry were based directly on the measuring networks. The accuracy parameters of these networks are lower compared to modern measurement networks. Currently, the archive materials of the State Geodetic and Cartographic Resources are used during the performance of geodetic works concerning real estates. The work presents and evaluates the set of three methods of improving the accuracy parameters of the former registry and measurement networks. The first method (I) includes the transformation of the coordinates of the former networks points to the current coordinate system basing on the coordinates of the adjustment points. The second method (II), is based on the strict adjustment of the network together with the additional measurement of the selected points in order to strengthen the network. The third method (III) consists in inventory and survey of all existing points of former networks and strict adjustment of the grid in order to determine the coordinates of destroyed points. The effectiveness of former networks revaluation methods was assessed on the basis of experimental research, in which data from test objects were used. Satisfactory results of improved networks accuracy parameters have been achieved by the method "I" in cases where the ratio of the number of adjusted points to the total number of tested points was equal about 1/3. Similarly for the "III" method, satisfactory results can be achieved when about 30% of network points are used as additional control points. However, in the method "II" good results can be achieved when the percentage of found points and points used as control points is only about 10% of all network points. By complex studying of the geodetic works outlays (field and chamber work) it was found that both the "I" method and the "II" method of revaluation of networks are similar in efficiency.

**Keywords:** modernization of land and building registry, cadastre, spatial data quality

*Przesłano do redakcji: 16.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*

Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK<sup>1</sup>  
Dominika SKOWROŃSKA<sup>2</sup>

## APPROACH TO ANALYSE THE STATE OF HEALTH RESORTS BASE IN PODKARPACKIE PROVINCE

In the work the approach to analyse the state of the health resorts located in Podkarpackie province was presented. The characteristics of Horyniec-Zdrój, Iwonicz-Zdrój, Polańczyk and Rymanów-Zdrój include a historical overview, description of climate, soil and water, health resort protection zones, available mineral water and medical raw materials and also description of performed treatments. The analysis was made on the basis of statistical data concerning the number of active centres, the number of patients, the number of performed treatments and the analysis of municipal infrastructure in the years 1995-2016. The analysis was performed on the basis of statistical data from Central Statistical Office. Additionally, the indicators of water supply infrastructure development and indicators of tourism development were calculated. The work is aimed at analysing all health resorts bases in the Podkarpackie province and determining which health resort develops best, where individual treatments are offered, as well as what medical raw materials caused that these places provide balneological treatments.

**Keywords:** health resort, characteristics of health resorts, municipal infrastructure, indicators of tourism development

### 1. Introduction

The increase in interest in natural medicine influenced the significant development of spa activities in Poland between the nineteenth and twentieth century, then after the end of the Second World War great emphasis was placed on the reconstruction and reactivation of damaged health resort bases. Areas of spas began to grow and gain publicity not only in the country but also in all of Europe.

Health resort treatment has become an alternative to pharmacology due to the lack of side effects and the length of the lasting effect of the action. Health resort tourism in Poland is a well-known brand in foreign markets, which results in

---

<sup>1</sup> Author for correspondence / autor do korespondencji: Katarzyna Pietrucha-Urbanik, Rzeszow University of Technology, Faculty of Civil, Environmental Engineering and Architecture, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, Corresponding Author: e-mail: kpiet@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Dominika Skowrońska, Rzeszow University of Technology, Faculty of Civil, Environmental Engineering and Architecture, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

a very large national income. In addition to the well-known health resort bases in the country, there are also places in Podkarpackie that offered balneotherapy in the last century. In these places are also mineral springs that could be used in health resort therapies [1, 2]. There are four health resort bases in the Podkarpackie Province. Health resort lowland Horyniec-Zdrój is located in the north-eastern part of the province, health resorts Iwonicz-Zdrój and Rymanów, foothill health resort, located in the southwestern part of the province and a highland resort Polańczyk is located in the south of the province in the Bieszczady mountains. Health resorts are known for natural mineral waters and healing, as well as from peat deposits that have been used for centuries in various balneological therapies. All four health resorts develop very dynamically, offering the patients various forms of health resort treatment and rest. All have a well-developed hotel, cultural, entertainment, recreational and gastronomic base [3, 4, 5, 6, 7].

The work is aimed at analyzing all health resort bases in the Podkarpackie province and determining which of the health resorts develops best, where individual treatments are offered, as well as what natural healing resources caused that these places provide balneological treatments. The main source of data for writing this paper were data from Central Statistical Office for the years 1995-2016 [8, 9].

## **2. Analysis of the health resort base of the Podkarpackie province**

### **2.1. Mineral waters and natural healing resources of health resorts**

In all four health resorts of Podkarpackie Province are sources of natural mineral waters extracted for food and medicines.

From 1867 in Iwonicz-Zdrój the salt of Iwonice, Jodobromowa, is produced. It is obtained from natural mineral waters by traditional brewing methods. It is used in rheumatic diseases, gynecology, neurology, joint pain, skin and respiratory diseases in the form of baths, inhalations and wraps [10].

The Horyniec-Zdrój health resort includes, among others natural mineral waters originating from the Róża III and Róża IV boreholes, these are poorly mineralized sulphide waters in which the hydrogen sulphide content ranges between 24 and 50 mg/dm<sup>3</sup>. In Iwonicz-Zdrój, there are i.a. two wells, the first of them, Emma, is chloride-bicarbonate-sodium water with traces of iodine, boron, fluorine and bromine, and the other is chloride-bicarbonate-sodium water from the Lubatówka 14 well, with traces of iodine, bromine and boron. The Rymanów-Zdrój health resort has a total of eight wells, with chloride-bicarbonate-sodium water, with traces of bromine, iodine and boron, also some water is bicarbonate-chloride-sodium, iodide, boron and fluoride.

A peat deposit "Podemszczyzna" is being exploited in Horyniec-Zdrój, it is so-called low peat-bog. It is used in the form of mud wraps and baths, as well as



massages and iontophoresis. The Iwonicz-Zdrój health resort has been using peat bogs since 1879, when it was brought from the surrounding forests. Currently, the health resort uses peat mines extracted from the deposits in Wola Chorzewska and Czarny Dunajec. These deposits are classified as low peatlands. They are used for mud compresses and baths. Polańczyk health resort does not have deposits of mud, but performs operations associated with its use. Rymanów-Zdrój extract mud from local lodges in the surrounding forests. It comes from low bogs containing iodine and traces of sulphates. It is used in the form of masks, full and partial wrappings, mud molds, galvanoborow and peloid iontophoresis [11, 12].

## 2.2. Analysis of the health resorts base of the Podkarpackie Province

Table 1 shows the number of actively operating sanatoriums and health resorts hospitals in the years 1995-2016.

In the years 1998-2007, we observe a decrease in the number of active health resort centers caused by the technical condition of buildings. Some have been restored and opened again, in addition to the presented centers in the Podkarpackie region, there are also three health resorts clinics. In every health resort, there are several or a dozen separate buildings that provide various forms of treatments. There are places such as health resorts, hospitals, clinics and other centers.

Table 2 presents the number of men and women, who stayed in the area of individual health resort facilities in 2010-2015.

Tab. 1. Total number of sanatoriums and health resort hospitals

Tab. 1. Całkowita liczba sanatoriów i szpitali uzdrowiskowych

Year	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Objects	29	28	29	28	26	25	24	24	23	23	23
Year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Objects	23	22	22	23	23	23	24	25	24	25	25

Tab. 2. Summary of data on the number of women and men in health resorts

Tab. 2. Zestawienie danych dotyczących liczby kobiet i mężczyzn w ośrodkach uzdrowiskowych

Health resort facilities		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Hospitals	Man	7 321	5 749	6 030	4 815	4 871	5 014	4 942
	Woman	4 214	5 500	5 720	5 337	5 275	5 820	5 857
Sanatoriums	Man	19 936	19 604	19 314	19 496	18 181	19 916	18 986
	Woman	26 087	27 432	29 354	28 269	26 807	27 668	27 480
Health resort physicians and clinics	Man	1051	992	782	502	731	612	786
	Woman	722	801	602	511	1100	1023	1271

Table 3 shows the number of underage patients and the number of patients aged 65 or more residing in the health resort facilities in 2010-2015.

Tab. 3. Summary of data on the number of underage and people over 65 in health resorts

Tab. 3. Zestawienie danych dotyczących liczby osób niepełnoletnich i osób powyżej 65 lat w ośrodkach uzdrowiskowych

Health resort facilities		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Health resort hospitals	Less than 18 years	1 538	1 631	1 437	1 372	1 140	1 204	1 126
	More than 65 years	-	-	-	2 495	2 314	2 556	2 761
Health resort sanatoriums	Less than 18 years	1 775	2 020	1 552	1 727	1 667	1 548	1 676
	More than 65 years	-	-	-	13 635	10 424	11 530	12 704

The number of people under the age of 18 remains constant in hospitals and sanatoriums as well as in health resort institutions. A vast minority are treated in health clinics. The same situation is with people over 65, the vast majority are treated in hospitals, sanatoriums and health resorts institutions. Also the stationary and outpatient treatment mode were taken into account. In the stationary mode, the majority of patients are treated, as many as 60 thousand a year in sanatoriums and health resort hospitals, and 10 thousand a year in health resort institutions. In turn, outpatient treatment covers 2,5 thousand patients in sanatoria and health resort hospitals and 4 thousand patients are treated in health resort institutions.

### 2.3. Medical treatments used in health resorts of Podkarpackie province

Depending on the possibilities, different health resorts offer various balneological treatments. It is influenced by geographical location, local climate, access to natural resources, materials and mineral waters as well as available financial expenses.

The individual health resorts of Podkarpackie province offer following treatments:

- mineral baths: pearl, carbonic, cold-heat,
- baths using gases: ozone, carbon dioxide,
- mud treatments: peat baths, peat packs, mud pebbles, peat iontophoresis,
- inhalations: group and individual,
- massages: classic, Aquavibron, Hydrojet, Intervac, lymphatic, pneumatic, underwater,
- cryotherapy: wraps, cryochamber,
- electrotherapy: diadynamics, ionophoresis, magnetotherapy, currents Kotza, Tensa, Trabert, electric-water bath, electrostimulation, electroplating, teraplus,

- light therapy: solux lamp, solaris, Bio-V, sanotherm, laser therapy,
- hydrotherapy: showers, rubbing, wrapping, local or general wraps,
- kinesiotherapy: group and individual,
- paraffin treatments: wraps,
- crenotherapy: drinking cure.

In the Table 4 summary of all treatments performed in 2010-2016 in health resorts and their percentage value in the province and in the whole country was presented.

Tab. 4. Summary of the performed health resorts treatments

Tab. 4. Zestawienie przeprowadzonych zabiegów uzdrowiskowych

No.	Type of treatment	Number of treatments in the Podkarpackie province	Number of treatments in Poland	Percentage of individual treatments in the Podkarpackie province [%]	Percentage in the country scale [%]
1.	Mineral baths	1640762	20123914	6,92	8,48
2.	CO <sub>2</sub> baths	749496	7472806	3,16	3,15
3.	Mud treatments	2238154	20936110	9,44	8,82
4.	Inhalation	1394252	11580232	5,88	4,88
5.	Massages	2349827	24076452	9,91	10,14
6.	Cryotherapy	977600	10230941	4,12	4,31
7.	Electrotherapy	3033084	31069295	12,79	13,09
8.	Phototherapy	1545286	17422311	6,51	7,34
9.	Water cure	2012230	25760351	8,48	10,85
10.	Kinesiotherapy	6491815	51329376	27,37	21,62
11.	Paraffin treatments	233671	1831991	0,99	0,77
12.	Other healing treatments	1055097	15583675	4,45	6,56
Total:		23721274	237417435	100,00	100,00

In the whole health resort base of the Podkarpackie province, more than 20 million treatments have been performed in the examined time. Most treatments were performed in the kinesiotherapy department, then in the electrotherapy and massage department. The lowest classifies treatments are in the field of cryotherapy and therapeutic baths in carbon dioxide. The least was done through paraffin treatments.

#### 2.4. Municipal infrastructure of health resort communes in the Podkarpackie province

In the analysis of communal infrastructure development, the rural-urban areas of the Podkarpackie health resorts were taken into account. In the last year of analysis, most people use the water supply network in Horyniec-Zdrój (82%),

then in the Solina municipality, in which is located Polańczyk (78%), Iwonicz Zdrój (56%) and Rymanów Zdrój (41%).

The longest water supply network is in the Solina commune, however the largest number of water connections to buildings is in the Rymanów-Zdrój commune. The shortest water supply network has the Iwonicz-Zdrój commune.

Taking into account the degree of sewerage, the most percentage using sewage systems, as much as 97% occurs in Iwonicz Zdrój, then in Rymanów Zdrój (82%), Horyniec Zdrój (64%) and the Solina commune (57%).

The longest sewerage network and the largest number of connections to buildings are in the Rymanów-Zdrój commune. The shortest sewerage network has the Solina municipality. A bigger degree of sewerage than water supply in Iwonicz Zdrój and Rymanów Zdrój may result from the use of individual sources of water supply.

In turn, almost 94% of the population uses gas pipelines in the municipalities of Iwonicz Zdrój and Rymanów Zdrój, in the commune of Solina and Horyniec Zdrój there is a small percentage of users of 10,5% and 0,4% respectively. The longest active gas network is in the Rymanów-Zdrój commune, and the shortest in commune of Horyniec-Zdrój. Most of the gas recipients have the Rymanów-Zdrój commune, up to 14 789 people.

Also the failure rates of the water supply network of examined health resorts were taken into account. It is recommended to assess the condition of the assets and decide when repair, renovation or replacement should be performed according to guidelines presented in ISO 24516-1:2016 [13]. The technical state of water network was assessed in the form of failure rate including number of failures per kilometre per year. In all distinguished health resort communes, the decrease of failure rate of water pipe was observed in comparison to the previous year. The value of failure rate was from  $3,09 \text{ a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  in Iwonicz Zdrój, in other health resorts the value of failure rate indicated much lower values, including Rymanów Zdrój  $0,246 \text{ a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , Horyniec Zdrój  $0,33 \text{ a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  and the smallest value which equals  $0,089 \text{ a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  was in the Solina commune. According to the recommendations presented in the works [14,15], the failure rate does not exceed  $0,1 \text{ a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  as in case of water network in Solina commune, characterize low failure rate of water network and high reliability, in other cases the average failure rate and reliability can be distinguished with the failure rate in the range from 0,1 to  $0,5 \text{ a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  and the last with high failure rate and low reliability for the failure rate over  $0,5 \text{ a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ .

From the communes in which there are places with health resort potential the longest water supply network has the Lubenia commune, in which Lubenia and Straszycle are located, the shortest has the Brzozów commune. The largest number of water supply connections is located in the Dębica commune, and the Lesko commune has the largest water consumption. The longest sewerage network has the Brzozów commune, in the area of which Brzozów and Humniska are located. The shortest sewerage network has the commune of

Komańcza. Most sewer connections occur in the community Brzozów, and the largest amount of wastewater discharged was reported in the municipality of Dębica. Also it should be mentioned, that sensitive customer, such as disabled or ill people are supplied from public water supply systems in the areas of health resorts. For this reason, the water supply should be characterized by continuity and good protection [16].

### **2.5. Indicators of tourist development in health resorts communes**

In order to assess the tourism development of spa communes, basic indicators characterizing its development were determined [17]. The basic indicator used to assess tourist development of municipalities is the Defert's index, or else the assessment of tourist intensity of the area, determined as the quotient of the number of tourists using accommodation per the distinguished area, in km<sup>2</sup>. The areas on which the Defert's index exceeded 1000 are considered to be a well-developed tourist area. Only the Polańczyk health resort fulfills this requirement. In turn, the assessment of the intensity of tourist traffic can be presented by means of the Schneider's index determined by the quotient of the number of tourists using accommodation by a fixed number of area inhabitants. According to the Schneider's index, the town with a score of 500 is a well-developed tourist destination. Among the Podkarpackie health resorts, Iwonicz-Zdrój and Polańczyk meet this requirement. The assessment of the accommodation base density has been presented using the Baretje-Defert's indicator, calculated as the number of tourist beds to the number of permanent residents of the area. The Baretje-Defert's indicator showed that Horyniec-Zdrój and Rymanów-Zdrój are towns with little tourist traffic, Iwonicz-Zdrój is a town with a dominant tourist function, and Polańczyk is a big tourist center. However, the assessment of accommodation density has been determined as an indicator of the accommodation base density, as the ratio of the number of tourist accommodation places by the area expressed in km<sup>2</sup>. The largest density of accommodation is in health resorts in Polańczyk, while the smallest is in Horyniec-Zdrój.

### **3. Conclusions**

The most promising health resort is located in the Polańczyk. Despite the fact that it is the youngest health resort in Podkarpackie, it has the greatest potential and develops fastest, which was emphasized by the tourist development indicators of this city. The Solina commune has the largest increase in the water supply network. In addition, Polańczyk offers a wide range of spa treatments in a variety of forms. Its advantage is the brevity of the entire base, the distance between accommodation bases and buildings offering treatments is small. There are only 5 sanatoria on its site, of which only one is solely a lodging base. In the

remaining four, some of the treatments can be used without leaving the sanatorium.

The second most growing center of the health resort is Iwonicz-Zdrój, which according to the tourist intensity ratio is a place with dominant tourist function. In the municipality of Iwonicz-Zdrój, the smallest increase in the water supply network was calculated. In addition, as in Polanazyk, it has a wide range of treatments in as many as eight centers. In Iwonicz-Zdrój there are five sanatoria, of which only two offer health resort treatments. In addition, there is also a hospital, a health resort center and a mineral water pump room. The successive development of the spa is also conditioned by spa facilities outside the Uzdrowisko Iwonicz, of which there are six objects. Thanks to them, more accommodation and treatment rooms are available for patients.

The third is the Rymanów-Zdrój health resort. According to the intensity of tourist traffic, Rymanów-Zdrój is a city with a low tourist traffic. The spa has a very wide range of spa treatments, with 10 spa centers in its area, of which five are only accommodation bases, two are combined centers (lodging bases and treatment rooms), and the remaining three are only facilities used to perform treatments.

Horyniec-Zdrój is in the last place in terms of tourist attractiveness and the offer of health resort treatments. According to the Baretje-Defert's index, it is a place with little tourist traffic. In comparison to other spas, Horyniec-Zdrój offers the smallest range of health resort treatments. It has five spa facilities, four in the area of A1 health resort area protection and one facility in the A2 area. Some of them, are only the accommodation base in the form of sanatoriums. Only sanatorium Bajka offers both accommodation and spa treatments. The other objects are only places offering health resort treatments. The dispersion of these objects in two zones and their number significantly affect the reduced interest in the base and its development.

Health resorts of the Podkarpackie region are gradually developing and maintaining a high level of services in the field of health resort treatment. The number of patients increases every year, increasing for the Poles and foreign guests. The offer of tourist facilities as well as accommodation facilities are also growing. The number of treatments is gradually increasing. It was stated that before the province would implement the opening of centers in places with health resorts possibilities, first of all, care should be taken for existing health resorts bases to further diversify the offer, modernize the centers, so that they would attract more potential clients.

## References

- [1] Rak J.: O możliwościach wykorzystania wód mineralnych w profilaktyce zdrowotnej (The possibilities of using mineral water in health prevention), *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 7-8, 2010, pp. 28-30.

- [2] Rak J., Pietrucha-Urbanik K.: Nowe – stare możliwości uzdrowiskowe województwa podkarpackiego (New - old health resort possibilities Podkarpackie Province). *Walory ekologiczne i turystyczne północnej części Euroregionu Karpackiego 2009*, pp. 293-301.
- [3] Rak J., Pietrucha-Urbanik K.: O złożach i źródłach wód uzdrowiskowych (About deposits and sources of health resort waters), *Technologia wody* nr 2/2010, 2010, pp. 70-74.
- [4] Rak J.: *Balneotechnika. Terapie uzdrowiskowe (Balneo-technique. Health resort therapies)*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
- [5] Rak J., Pietrucha-Urbanik K., Boryczko K.: *Balneotechnika. Wody mineralne (Balneo-technique. Mineral water)*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
- [6] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: Podkarpackie wody mineralne i lecznicze jako czynnik hydroterapii w turystyce (Subcarpathian mineral and therapeutic waters as a hydrotherapy factor in tourism). *Turystyka w parkach krajobrazowych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, Rzeszów 2009, pp. 155-170.
- [7] Rak R. J., Tchórzewska-Cieślak B., Pietrucha K.: *Balneotechnika. Walory uzdrowiskowe (Balneo-technique. Health resort qualities)*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2010.
- [8] Central Statistical Office. *Analytical Platform. Analyses and Decisions Support System. Knowledge Databases*, Warsaw 1995-2016.
- [9] Central Statistical Office. *Local Data Bank*, Warsaw 1995-2016.
- [10] [www.uzdrowisko-iwonicz.com.pl](http://www.uzdrowisko-iwonicz.com.pl), Strona Uzdrowiska Iwonicz-Zdrój, (access: 10.11.2016).
- [11] Kruczek Z., Weseli A.: *Uzdrowiska karpackie (Carpathian Health resorts)*. KAW, Kraków 1987.
- [12] Sielicka J.: *Informator - atlas uzdrowisk polskich (Catalogue - atlas of Polish health resorts)*. Izba Gospodarcza - Uzdrowiska Polskie, Warszawa 2005.
- [13] ISO 24516-1:2016. *Guidelines for the management of assets of water supply and wastewater systems – Part 1: Drinking water distribution networks*.
- [14] Kwietniewski M.: Awaryjność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce w świetle badań eksploatacyjnych (Failure of water supply and wastewater infrastructure in Poland based on the field tests), In: XXV Scientific-Technical Conference, Międzyzdroje, Poland, May 24-27, 2011, pp. 12-140.
- [15] Rak J.: *Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę (Issues of water supply system safety)*. Committee of Environmental Engineering Sciences, Lublin, Poland. 2005.
- [16] Rak J., Pietrucha-Urbanik K.: New directions for the protection and evolution of water supply systems - smart water supply. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture, JCEEA*, z. 62, nr 3/I/2015, pp. 365-373. DOI:10.7862/rb.2015.121.
- [17] Szromek A.: Wskaźniki funkcji turystycznej i ich współzależność z innymi wskaźnikami ekonomicznymi na przykładzie polskiej gospodarki w latach 2000-2010 (Indicators of tourist function and their correlation with other economic indicators on the example of polish economy in 2000-2010). *Prace naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu* 2012, nr 304, pp. 336-349.

## PODEJŚCIE DO ANALIZY STANU BAZY UZDROWISKOWEJ W WOJEWÓDZTWIE PODKARPACKIM

W pracy przedstawiono analizę baz uzdrowiskowych znajdujących się na terenie województwa podkarpackiego. Wykonano charakterystykę miejscowości Horyniec-Zdrój, Iwonicz-Zdrój, Polańczyk i Rymanów-Zdrój zawierającą rys historyczny, opis klimatu, gleb i wody, strefy ochrony uzdrowiskowej, dostępne wody mineralne i surowce lecznicze oraz opis przeprowadzanych zabiegów. Analizę wykonano na podstawie danych statystycznych dotyczących liczby działających ośrodków, liczby kuracjuszy, liczby wykonanych zabiegów oraz infrastruktury komunalnej w latach 1995-2016. Analizę sporządzoną na podstawie analizy danych statystycznych zebranych przez Główny Urząd Statystyczny. Ponadto dla tych miejscowości uzdrowiskowych obliczono wskaźniki rozwoju infrastruktury wodociągowej oraz wskaźniki rozwoju turystycznego. Praca ma na celu analizę wszystkich baz uzdrowiskowych na terenie województwa podkarpackiego oraz określenie, które z uzdrowisk rozwija się najlepiej, gdzie oferowane są poszczególne zabiegi, a także jakie naturalne surowce lecznicze spowodowały, że akurat te miejscowości świadczą zabiegi balneologiczne.

**Słowa kluczowe:** uzdrowisko, charakterystyka uzdrowisk, infrastruktura komunalna, wskaźniki rozwoju turystycznego

*Przesłano do redakcji: 14.09.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



Marian PONIEWIERA<sup>1</sup>  
Ewa MACIEJOWSKA-FIGIEL<sup>2</sup>  
Justyna ORWAT<sup>3</sup>

## ZASTOSOWANIE PROGRAMU GEOLISP DO TWORZENIA DOKUMENTACJI KARTOGRAFICZNEJ ODKRYWKOWEGO ZAKŁADU GÓRNICZEGO

W artykule przybliżono system obsługi kopalnianych map numerycznych Geolisp ze szczególnym uwzględnieniem modułu Odkrywki. Omówiono kolejne funkcje modułu i możliwość jego zastosowania przy tworzeniu dokumentacji kartograficznej w górnictwie odkrywkowym. W pierwszej części pokazane zostały sposoby tworzenia map górniczych na podstawie danych z pomiaru. Wyróżnione tu zostały metody wstawiania znaków umownych, linii oraz kreskowań niezbędnych przy tworzeniu tego typu dokumentacji. Następnie przedstawiono możliwości programu przy przetwarzaniu utworzonych map, między innymi: transformacja map między układami współrzędnych, przygotowanie rysunków do wydruku oraz tworzenie map pochodnych. W artykule omówiono istotne, z punktu widzenia górnictwa odkrywkowego, funkcje programu, a mianowicie: obliczanie objętości zwałowisk, tworzenie wykresów (przekroi i profili) oraz powierzchni NMT na podstawie utworzonych map wyrobisk górniczych. Powierzchnie te utworzyć można zarówno na podstawie warstw jak i wykorzystując współrzędne stropu lub spągu pokładu np. zestawione w plikach tekstowych. Tak utworzone powierzchnie umożliwiają wizualizację elementów pokładu oraz zaplanowanie dalszych prac górniczych. Kolejno ukazano, jak na bazie utworzonej topologii wykonać mapę tematyczną. W tej części artykułu zostały pokazane kolejne kroki tworzenia parcel oraz kontrola ich topologii, a także sposób wygenerowania raportu parcel. Zaprezentowano także moduł, który służy do przygotowania produkcji. W końcowej części artykułu skupiono się na praktycznych przykładach wykorzystania tak utworzonej dokumentacji kartograficznej.

**Słowa kluczowe:** górnictwo odkrywkowe, mapy numeryczne, mapy górnicze, numeryczny model złoża, obliczanie objętości

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Marian Poniewiera, Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Zakład Geodezji i Ochrony Terenów Górniczych, ul. Akademicka 2, 44–100 Gliwice; tel. 322372990; marian.poniewiera@polsl.pl

<sup>2</sup> Ewa Maciejowska-Figiel, Politechnika Śląska; ewa.maciejowska-figiel@polsl.pl

<sup>3</sup> Justyna Orwat, Politechnika Śląska; justyna.orwat@polsl.pl

## 1. Wprowadzenie

Gdy mówi się o polskim górnictwie, pierwszymi obrazami, jakie stają przed oczami, są: podziemny zakład górniczy, węgiel kamienny i sylwetka pracującego górnika. Jednak to nie górnictwo podziemne, a odkrywkowe stanowi istotną część polskiej gospodarki. Dowodem na to są liczby czynnych kopalni węgla kamiennego jest około 30 (stan na 2016 rok), a tych wydobywających metodą odkrywkową około 7000. Kopalnie te wydobywają 40 różnych kopaliny, m.in. surowce energetyczne, kruszywa naturalne (piaski, żwiry) i ilaste (gliny). Roczne wydobycie metodą odkrywkową wynosi ponad 350 mln ton. Zatrudnienie w tego typu kopalniach znajduje tysiące pracowników, i to zarówno jako zaplecze techniczne, jak i badawczo-projektowe [1,2].

Zgodnie z przepisami [3] wszystkie, nawet niewielkie kopalnie muszą sporządzać dokumentację kartograficzną. W dobie komputerów i nowoczesnych technologii tworzenie wymaganej dokumentacji technicznej nie wymaga już dużego nakładu czasu, łatwiejsze jest też dokonywanie coraz bardziej skomplikowanych obliczeń. Pomiarów metodami: GPS, fotogrametrycznymi, skaningu laserowego (przy zastosowaniu samolotów lub dronów) dostarczają bardzo dużo szczegółowych informacji o ukształtowaniu terenu. Uporządkowanie tych danych jest możliwe dzięki prowadzeniu map numerycznych, które można powiększać, edytować oraz przetwarzać. Stwarza to coraz większe możliwości w zakresie modelowania powierzchni terenu (modele numeryczne) oraz wykonywania tak istotnych w górnictwie odkrywkowym obliczeń, jakimi są szacowanie objętości zwałowisk oraz skarp. Oczywiście, aby wykonywać wszelkie operacje na komputerze, niezbędnym jest posiadanie odpowiedniego oprogramowania przeznaczonego do tego celu. Najlepszym będzie takie, które posiada funkcje umożliwiające pracę z dokumentacją kartograficzną.

Z myślą o tych wymaganiach powstał moduł Odkrywki systemu Geolisp. Sam system zawiera szereg programów wspomagających pracę działu mierniczo-geologicznego (w przypadku zakładów górniczych) oraz samego geodety (w przypadku prac prowadzonych przez niego na powierzchni terenu). Są one pomocne przy tworzeniu, aktualizacji oraz analizie map numerycznych. Na szczególne wyróżnienie zasługują tu: możliwość uzyskania wybranej mapy tematycznej w dowolnej skali, tworzenie numerycznego modelu terenu wraz z procedurami ułatwiającymi jego wizualizację, obliczanie objętości i tworzenie (interpolacja) warstw terenu; sporządzanie profili i przekrojów terenu; szybkie kartowanie numeryczne (dostępna pełna biblioteka znaków umownych, zarówno powierzchniowych, jak i górniczych) oraz przeprowadzanie transformacji między układami współrzędnych. System Geolisp zawiera ponad 1000 procedur, które uzupełniają możliwości programu AutoCAD oraz pomagają rozwiązywać konkretne zadania. System ten został podzielony na moduły, a każdy z nich składa się z grupy programów. Programy te zostały ze sobą powiązane tematycznie [4].

Można tu jeszcze wspomnieć, że na stronie internetowej [www.geolisp.pl](http://www.geolisp.pl) dostępny jest darmowy moduł MP-NMT, który zawiera wiele z opisanych w artykule funkcji.

Opisywany w tym artykule moduł Odkrywki zawiera szereg programów przewidzianych do tworzenia dokumentacji kartograficznej oraz wykonywania, na jej podstawie, obliczeń w zakładach odkrywkowych. Wyróżnić tu można m. in. tworzenie map na podstawie wyników pomiarów bezpośrednich, tworzenie map pochodnych, przetwarzanie map (zmiana skali, transformacja między układami współrzędnych), tworzenie map warstwicznych, profili oraz przekroi. We współpracy z firmą AlgoRes-Soft stworzono moduł służący do kalibracji rastrów.

## 2. Tworzenie map na podstawie bezpośredniego pomiaru

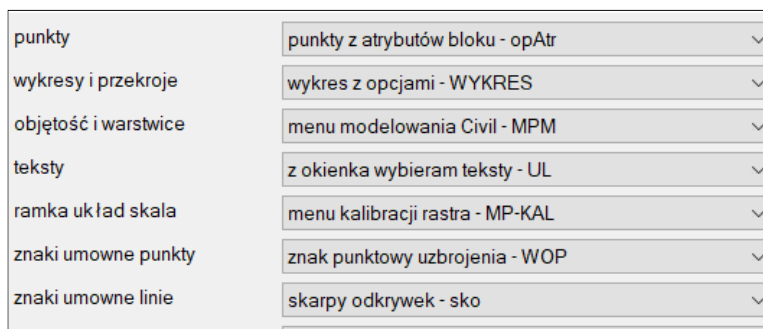
System Geolisp wyposażony jest w szereg przydatnych pasków narzędzi. Paski te można dostosowywać do własnych potrzeb włączając lub wyłączając poszczególne moduły. Na paskach tych umieszczone zostały najczęściej używane linie oraz bloki. Paski, które służą do tworzenia map na podstawie danych bezpośrednio pomierzonych w terenie, przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Paski narzędzi programu Geolisp

Fig. 1. Geolisp toolbars

Większość użytecznych poleceń można wywołać z okna dialogowego MP-Odkrywki (rys. 2), które wywołuje się poleceniem MPO.

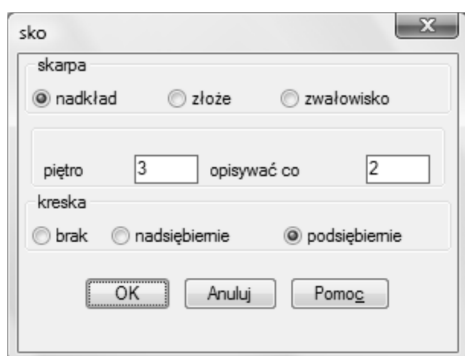


Rys. 2. Okno dialogowe „MP-ODKRYWKI”

Fig. 2. Dialog box ‘MP-OUTCROPS’

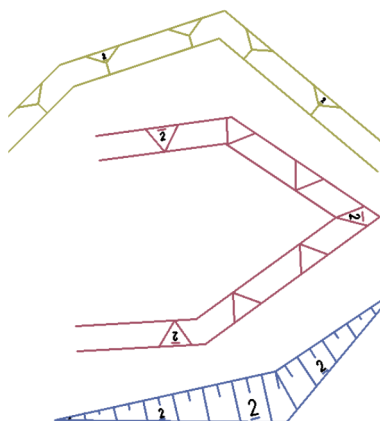
Istotne, z punktu widzenia pracy z programem, jest również ustawienie odpowiednich parametrów początkowych rysunku. W wywołanym oknie MP Ustawienia można wybrać operatora, numer dokumentacji, obiekt, skalę, układ współrzędnych itd.

W skład systemu Geolisp wchodzi bogata biblioteka znaków umownych zawierająca znaki z zakresu geodezji, górnictwa podziemnego i odkrywkowego, geologii, transportu kolejowego, urbanistyki i innych. Podczas kartowania mapy poleceniem WL można wybrać bibliotekę obiektów liniowych, natomiast poleceniem WB bibliotekę obiektów punktowych. Program został wyposażony we wszystkie znaki umowne dotyczące kopalń odkrywkowych, które zostały stworzone na podstawie aktualnie obowiązujących norm [5 - 7]. Skomplikowane znaki umowne kreślone są przy pomocy odpowiednich mini-programów np. nanoszenie skarpy odkrywek (rys. 3b). Polecenie SKO otwiera okno dialogowe przedstawione na rysunku 3a.



Rys. 3a. Okno dialogowe „SKO”

Fig. 3a. Dialog box ‘SKO’



Rys. 3b. Przykład skarpy utworzonej w programie Geolisp

Fig. 3b. Example of a bank made in the Geolisp program

Należy wybrać odpowiednie opcje: czy jest to nadkład, złoże czy zwałowisko, podać, które to piętro, wskazać jak często powinien być posadowiony opis, zaznaczyć odpowiedni typ kreskowania.

### 3. Przetwarzanie utworzonych map

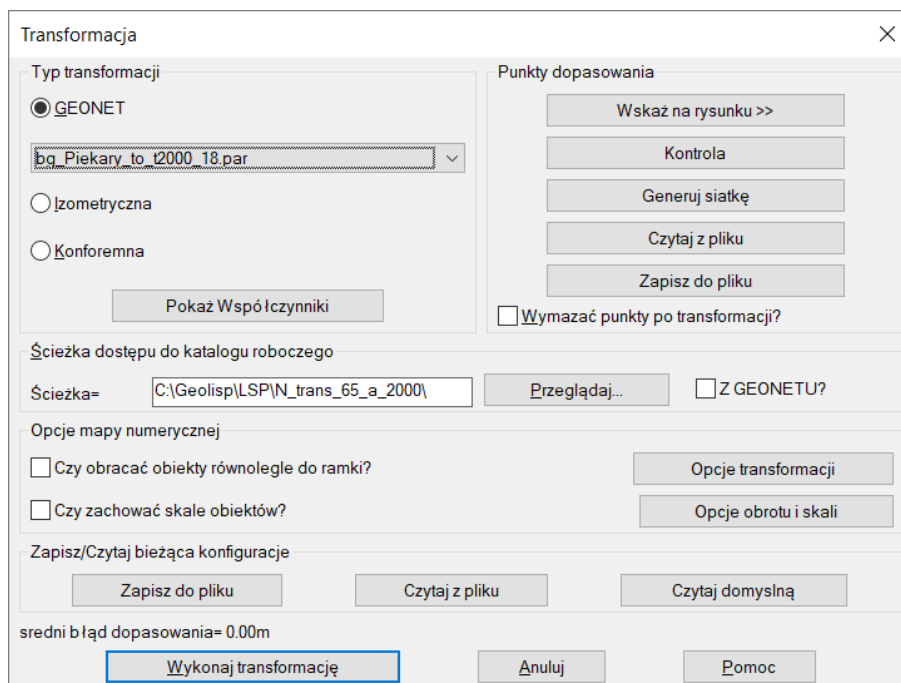
Niewątpliwą przewagą mapy numerycznej nad mapą analogową jest możliwość dowolnego jej przetwarzania.

Pomimo tego, że mapy powinny być sporządzane w obowiązującym państwowym układzie współrzędnych prostokątnych płaskich PL-ETRF2000 [8], to nadal można jeszcze spotkać starsze dokumenty, w których zastosowano inne

układy współrzędnych. Czasem są to układy lokalne, takie jak Sucha Góra czy Borowa Góra [9], a czasem dawne państwowe np. 1965.

System Geolisp został wyposażony w szereg poleceń służących do transformacji danych zawartych na mapie numerycznej do żądanego układu współrzędnych. Jak wynika z rysunku 4, istnieje możliwość wyboru pomiędzy różnymi typami transformacji, począwszy od izometrycznej oraz konforemnej, a kończąc na transformacji między poszczególnymi układami współrzędnych.

Transformacje izometryczna oraz konforemna wymagają wskazania odpowiednich punktów dopasowania poprzez wybranie ich z rysunku lub też wczytanie z pliku. Punkty te można skontrolować pod względem dokładności dopasowania po uruchomieniu programu lub po wybraniu przycisku Kontrola.



Rys. 4. Okno dialogowe „Transformacja”

Fig. 4. Dialog box ‘Transformation’

System Geolisp umożliwia również przeskalowanie obiektów z mapy podstawowej do dowolnej skali. Ponadto posiada on również szereg poleceń, które ułatwiają przygotowanie mapy do wydruku, m.in. wstawianie ramki mapy, opisów pozaramkowych, siatki krzyży oraz ustawienie odpowiednich kolorów i widoczności obiektów.

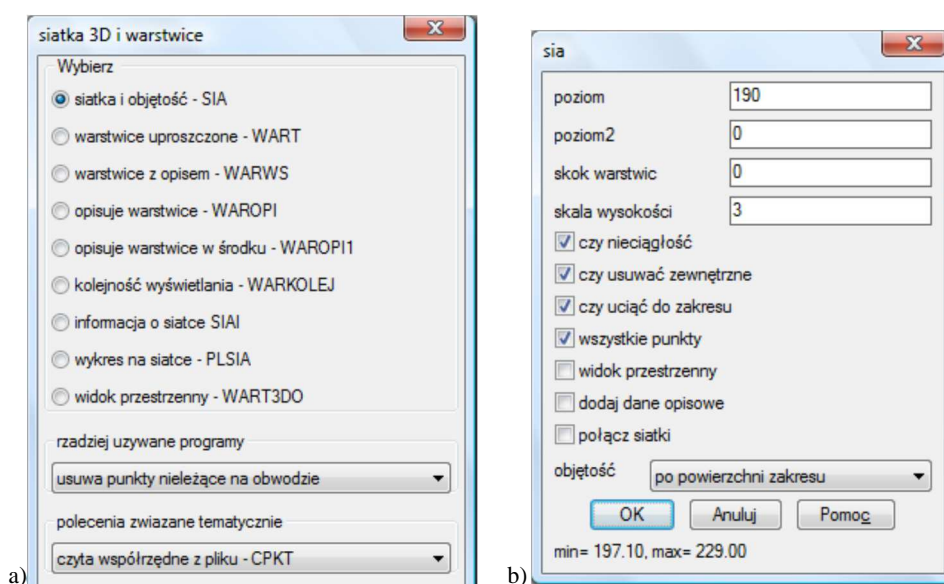
#### 4. Obliczanie objętości zwałowisk

Zagadnienia związane z tworzeniem numerycznego modelu terenu i złoża oraz z obliczaniem objętości to istotny element dokumentowania i planowania prac w kopalniach odkrywkowych. Możliwości technologiczne związane z pomiarem tego typu utworów skalnych są coraz większe, począwszy od nowoczesnych tachimetrów oraz odbiorników GPS, a skończywszy na dronach wyposażonych w skanery laserowe. Tego typu pomiary dostarczają bardzo wielu informacji o budowie danego nasypu, skarpy czy zwałowiska.

Są dwa sposoby uzyskania numerycznego modelu terenu w module Odkrywki. Pierwszy wymaga posiadania oprogramowania AutoCAD Civil 3D, drugi można stosować w dowolnym oprogramowaniu CAD, które obsługuje język oprogramowania LISP. Poniżej omówiono sposób drugi.

W pierwszej kolejności poleceniem CPKT wprowadzamy na mapę punkty z wykonanego pomiaru. Polecenie to tak przemieszcza opisy numerów i rzędnych punktów, aby na siebie nie nachodziły. Oprócz tego potrafi ono przetransformować współrzędne „w locie”.

Na rys. 5a przedstawiono okno dialogowe pokazujące listę dostępnych programów w menu MP-Sia, m.in. utworzenie siatki trójkątów i obliczanie objętości, wyrysowanie warstwic oraz dostosowanie ich opisu.

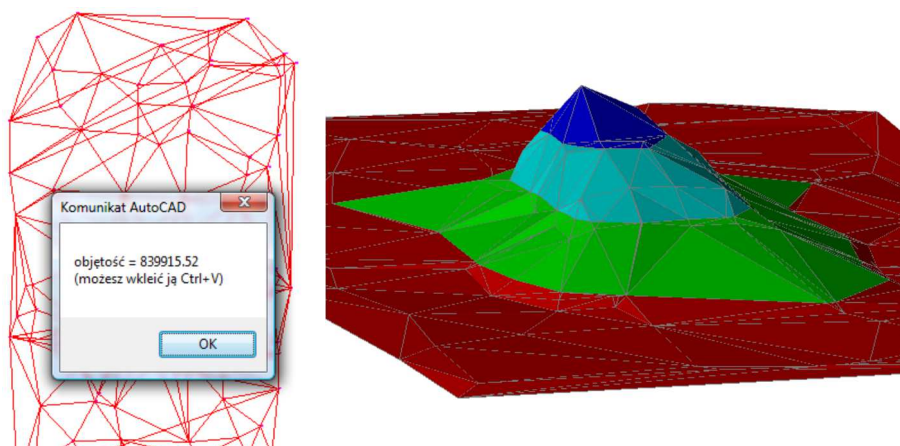


Rys. 5. Okno dialogowe „siatka 3D i warstwy” (a); Okno dialogowe „sia” (b)

Fig. 5. Dialog box ‘3D mesh and isolines’ (a); Dialog box ‘sia’ (b)

Polecenie SIA, które służy do wyznaczania objętości danej skarpy lub nasypu uruchamia kolejne okno dialogowe, jak na rysunku 5b. Program Zakres automatycznie rysuje obwiednię wskazanych punktów, którą można następnie ręcznie poprawić i która będzie granicą tworzonego modelu terenu. Podczas obliczeń uwzględniane są linie nieciągłości np. skarpy, potoki, jeziora – wcześniej trzeba wskazać linie na odpowiednie warstwy rysunku.

Objętość siatki obliczana jest jako suma objętości graniastosłupów, których górna podstawa opiera się na siatce, a dolną podstawę stanowi, w zależności od wybranej opcji: dodatkowa powierzchnia trójkątów powstała w wyniku połączenia punktów obwiedni lub zdefiniowany poziom. Po zatwierdzeniu operacji pojawia się okno dialogowe zawierające informację o wyniku i zapisywany jest raport. Dostępna jest również opcja wygenerowania przestrzennego widoku obiektu przy pomocy polecenia WART3DO (rysunek 6).



Rys. 6. Przykład obliczeń objętości i wizualizacji 3D zwałowiska

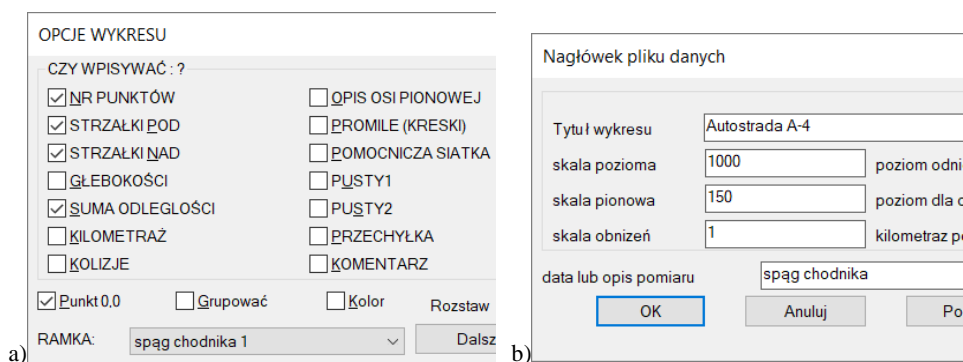
Fig. 6. Example of volume calculations and 3D visualization of embankment

## 5. Tworzenie wykresów (profilu i przekrojów)

Program Geolisp zawiera także pakiet programów, które służą do automatycznego tworzenia wykresów. Dane potrzebne do stworzenia profilu lub przekroju mogą być zaczerpnięte z samego rysunku, jak i z przygotowanego wcześniej pliku tekstowego. Obie opcje muszą zawierać dane niezbędne do utworzenia wykresu. Aby stworzyć wykres, należy wybrać odpowiednią ikonę lub wpisać polecenie WYKRES. Następnie w oknie dialogowym należy ustalić źródło danych dla wykresu. Jeśli jest to plik wsadowy, to należy ustawić odpowiednią ścieżkę dostępu do tego pliku. Jeżeli zaś wykres ma być utworzony na podstawie danych z rysunku, należy wskazać na mapie linię przekroju. Po wybraniu opcji utworzenia przekroju z pliku tekstowego należy w oknie dialogowym ustawić

odpowiednie założenia, tj. kolejność numerów punktów, współrzędnych sytuacyjnych i wysokościowych oraz które wysokości mają być czytane do sporządzenia wykresu, można na jednym wykresie przedstawić kilka linii np. skarpe, lustro wody i dno potoku.

W kolejnym oknie dialogowym (rys. 7b) można zmienić tytuł wykresu, ustawić jego skalę poziomą, pionową i obniżeń, poziom odniesienia i kilometrąż początkowy. W przypadku, gdy plik źródłowy nie zawiera tych danych, są one automatycznie uzupełniane. Po zatwierdzeniu omawianych opcji program przechodzi do kolejnego okna dialogowego (rys. 7a), w którym można zaznaczyć, jakie informacje powinny znaleźć się na wykresie i wybrać miejsce jego wstawienia.



Rys. 7. Okno dialogowe „Opcje wykresu” (a); Okno „Nagłówek pliku danych” (b)

Fig. 7. Dialog box ‘Graph option (a); Dialog box ‘Title of data file’ (b)

Istnieje również opcja zaprojektowania dodatkowej linii na utworzonym wcześniej wykresie np. projektowanego dna potoku – polecenie PROJ. W tym celu należy podać rzędną początku projektowanego odcinka i wpisać jego nachylenie. Aby dodać do wykresu zaprojektowaną linię, należy użyć polecenia ZAPPROJ. Do wykresu możemy dodać linię regresji liniowej, wielomianowej lub obliczonej metodą geostatystyczną.

Jeżeli wykres ma zostać wykonany na podstawie danych z rysunku, należy wybrać znajdującą się na rysunku polilinię 3D (lub wcześniej wrysować ją, łącząc punkty posiadające współrzędne X, Y i Z). Aby szybko utworzyć wykres na podstawie polilinii, należy wpisać polecenie WYK2 i wskazać odpowiednie dane. Program zapyta o miejsce wstawienia wykresu, należy je wskazać poprzez kliknięcie w pożądany punkt.

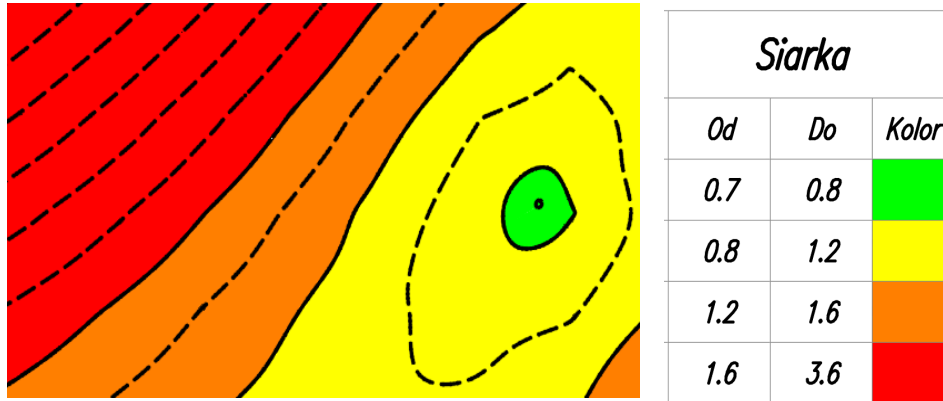


## 6. Tworzenie NMT na podstawie map numerycznych

Numeryczny Model Terenu jest cyfrową, dyskretną reprezentacją wysokości topograficznej powierzchni terenu wraz z możliwością odtworzenia jej kształtu na określonym obszarze. NMT umożliwia m. in.: określenie wysokości punktu o znanych współrzędnych X i Y, zamodelowanie kształtu powierzchni terenu oraz określenie wielkości pochodnych od kształtu [10]. Jak podpowiada sama definicja, posiadanie NMT danego obszaru przynosi wiele korzyści. Na podstawie takiego modelu można w szybki sposób określić ukształtowanie terenu i wyznaczyć np. strefy zagrożone zalaniem, określić wysokości punktów i spadki zboczy, wyznaczyć objętości mas skalnych czy zbiorników wodnych oraz przeprowadzać wszelkie prace związane z projektowaniem na danym terenie. Aby wykonać taki model, niezbędne jest posiadanie danych dotyczących danego terenu. W przypadku, gdy na danym obszarze jest prowadzona mapa numeryczna, można wykorzystać informacje zawarte w obiektach takich, jak: bloki, punkty, linie nieciągłości czy warstwy lub inne pliki tekstowe. Na podstawie tych danych można utworzyć w programie AutoCAD Civil 3D powierzchnię trójkątów TIN, której właściwości i sposób wyświetlania poszczególnych jej komponentów wybiera sam użytkownik. Ponadto w przypadku, gdy danych jest zbyt dużo (może to spowodować nieczytelność obrazu lub trudności z przeliczeniem modelu), istnieje możliwość redukcji liczby punktów lub skrócenia krawędzi trójkątów. Program, na podstawie odpowiedniego wielomianu aproksymującego, wstawi dodatkowe punkty i uwzględni je podczas procesu wygładzania modelu.

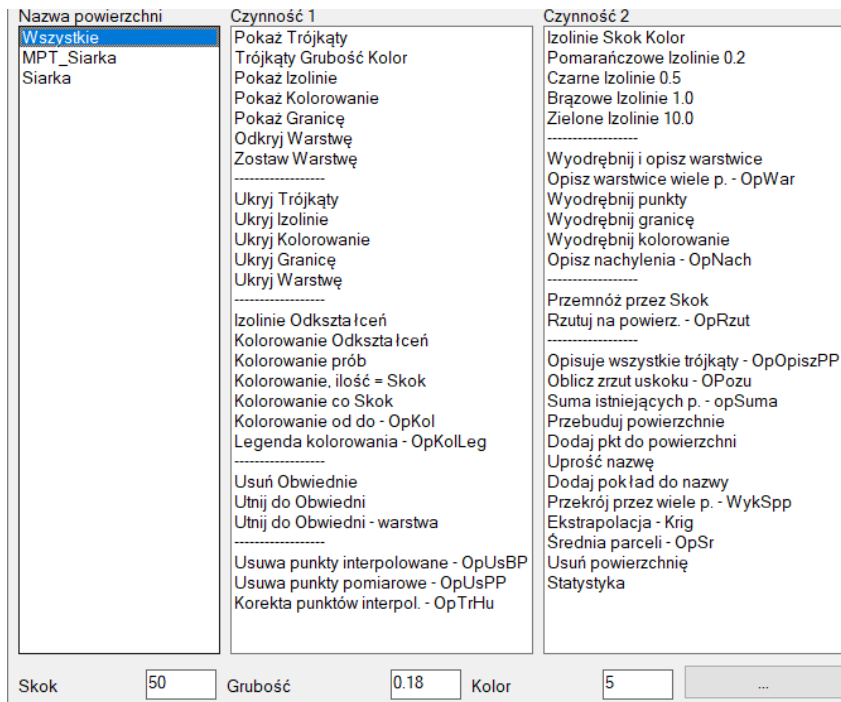
Prowadzenie mapy numerycznej w systemie Geolisp pozwala na szybkie przetworzenie utworzonych obiektów, np. bloków miąższości i analizy chemicznej, punktów osnowy, kot wysokościowych czy otworów geologicznych na punkty, które stanowią podstawę do wykonania powierzchni TIN. Wówczas współrzędne sytuacyjne pokrywają się z punktem wstawienia bloku, natomiast trzecia współrzędna równa jest wartości danego atrybutu. Wstawienie do rysunku tak powstałych punktów pozwala na utworzenie powierzchni dowolnego parametru, np. spągu lub miąższości. Sposób wizualizacji takiej powierzchni można dopasować do własnych potrzeb, stosując np. kolorowy gradient, trójkąty lub izoliny. Na rys. 8 przedstawiono przykład wizualizacji powierzchni zasarczenia złoża metodą zakresów.

W przypadku, gdy zajdzie potrzeba zmiany sposobu wizualizacji utworzonych powierzchni, należy wybrać polecenie OP (rys. 9). W programie tym można dowolnie operować stylami danej powierzchni, np. pokazać siatkę trójkątów, utworzyć warstwy czy mapę hipsometryczną. Można również dowolnie zmieniać sposób wizualizacji izolinii poprzez zmianę ich skoku czy koloru. Opis warstw jest tak umieszczany, aby nie nachodził na inne obiekty rysunku. Program umożliwia przycięcie danej powierzchni do wybranej obwiedni. Istnieje możliwość uzyskania trójwymiarowej mapy terenu poprzez zrzutowanie punktów, bloków i innych obiektów na wybraną powierzchnię TIN.



Rys. 8. Wizualizacja powierzchni zasiarczenia złoża przy pomocy kolorowania

Fig. 8. Visualization of the sulfur surface using coloring option



Rys. 9. Okno dialogowe „OP”

Fig. 9. Dialog box 'OP'

## 7. Topologia, generowanie map tematycznych

Topologia jest zestawem geometrycznych relacji między poszczególnymi elementami rysunku. Określa ona, w jaki sposób linie, węzły i regiony łączą się i odnoszą do siebie. Pozwala na wykonanie przestrzennych analiz takich jak np. znalezienie najkrótszej drogi, znalezienie właścicieli działek, przez które przebiega planowany gazociąg itd. Topologia gwarantuje nam, że regiony np. parcele zasobowe nie nachodzą na siebie, ani nie ma między nimi pustych miejsc. W systemie Geolisp istnieje procedura ułatwiająca skontrolowanie topologicznej poprawności obiektów i stworzenie topologii. Najpierw sprawdzane są linie, następnie centroidy. W przypadku znalezienia błędów (niedociągnięć linii, krótkich odcinków, braku lub podwójnej centroidy) program zaznacza błędne miejsca i oczekuje ich poprawy. Program należy uruchamiać do momentu, gdy wszystkie błędy zostaną usunięte a topologia wykonana.

Geolisp daje możliwość sporządzania mapy tematycznej np. kolorując parcele zgodnie z ich kategorią rozpoznania. Stworzono narzędzie umożliwiające utworzenie raportu dla wskazanych na mapie parcel (zamkniętych polilinii utworzonych automatycznie na podstawie topologii). Na podstawie numerycznego modelu złoża program oblicza potrzebne dane np. tonaż złoża i przenosi je do arkusza kalkulacyjnego (rys. 10).

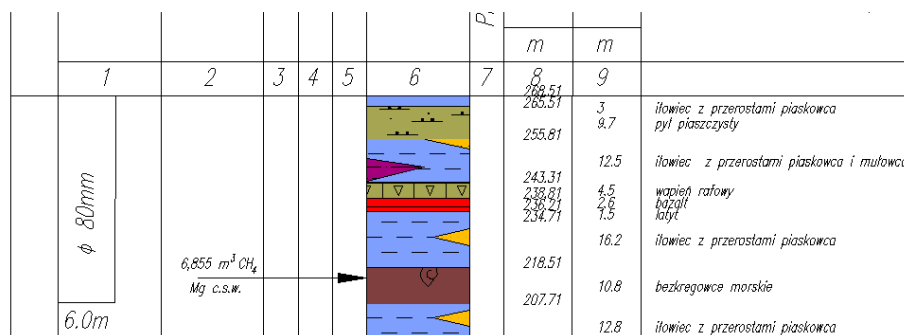
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Parcela	Pole	Miąższość	Postęp	Gęstość	Zasoby	Wydobycie	Upad
2	(nr)	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m/d]	[t/m <sup>3</sup> ]	[tys. t]	[t/d]	[°]
3	C-1	269 568	1.8	0.9	1.47	257.8	1215.8	15
4	C-2	407 866	1.8	0.9	1.45	288.3	1304.4	14
5	C-3	497 017	2.2	0.8	1.42	369.6	1496.3	13
6	C-4a	524 928	2.5	0.8	1.41	331	1426.9	12

Rys. 10. Fragment raportu parcel zasobowych

Fig. 10. Fragment of the resource parcel report

## 8. Przekrój przez górotwór

Istnieje procedura Karta-Otworu, która rysuje kartę otworu wiertnicze. W programie zdefiniowano wszystkie normowane znaki umowne skał i surowców mineralnych. Kolejny program umożliwia wykonanie równocześnie przekroi przez wiele powierzchni TIN co pozwala wykonać przekrój przez górotwór (rys. 11).



Rys. 11 Profil geologiczny

Fig. 11. Geological profile

## 9. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedstawiony w artykule opis modułu Odkrywki systemu Geolisp pokazuje jego przydatność przy tworzeniu dokumentacji kartograficznej dla zakładu górniczego wydobywającego kopaliny metodą odkrywkową. Zaprezentowane funkcje programu umożliwiają szybkie i precyzyjne tworzenie map górniczych oraz powierzchniowych dzięki bogatej bibliotece znaków i symboli umownych, utworzonych zgodnie z obowiązującymi aktami prawnymi oraz normami. Ponadto program wyposażony jest w wiele funkcji pozwalających na edycję powstałej dokumentacji np. przeskalowanie, zmiana układu współrzędnych, tworzenie map tematycznych. Autor programu stworzył także narzędzia, które umożliwiają automatyczne generowanie istotnych, z punktu widzenia projektowania dalszych prac górniczych, obiektów takich jak Numeryczny Model Terenu czy profile i przekroje. Należy podkreślić również, że program posiada bogatą bibliotekę poleceń, w której można szukać rozwiązań do zadań geodezyjnych oraz górniczych. Ponadto w pakiecie programu znajduje się wiele samouczków, które krok po kroku przeprowadzają użytkownika przez jego możliwości. System Geolisp, moduł Odkrywki to pakiet programów, które tworzą spójne i użyteczne narzędzie pracy w odkrywkowych zakładach górniczych. Większość poleceń dostępna jest w postaci bezpłatnego oprogramowania.

## Literatura

- [1] Kasztelewicz Z., Kozioł W.: Działalność górnictwa odkrywkowego w Polsce w okresie ostatnich 50 lat i perspektywa rozwoju na I połowę XXI wieku, Biuletyn AGH, nr 85, 2015, s. 8-15.
- [2] Popczyk M.: Zarys górnictwa odkrywkowego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2016.
- [3] Ustawa Prawo geologiczne i górnicze z dnia 9 czerwca 2011 r. z późn. zm., Dz.U. 2011 nr 163 poz. 981.

- [4] Poniewiera M.: Zastosowanie oprogramowania Geolisp do budowy dynamicznego systemu informacji o przestrzeni górniczej. Syst. Wspomag. Inż. Prod. 2017 vol. 6 iss. 3, s. 213-222.
- [5] PN-73/G-09016 Mapy górnicze. Umowne znaki wyrobisk odkrywkowych i zwałowisk.
- [6] PN-73/G-09017 Mapy górnicze. Umowne znaki robót strzelniczych w górnictwie odkrywkowym.
- [7] PN-73/G-09018 Mapy górnicze. Umowne znaki urządzeń i obiektów w górnictwie odkrywkowym.
- [8] Rozporządzenie Rady Ministrów z dn. 15.10.2012 r. w sprawie Państwowego Systemu Odniesień Przestrzennych, Dz.U. 2012 poz. 1247.
- [9] Maciaszek J.: System informacji o archiwalnych mapach i polach górniczych na potrzeby zagospodarowania przestrzennego, Wydawnictwo AGH, Kraków 2010, s. 98.
- [10] Sitek Z.: Fotogrametria ogólna i inżynierska, Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych im. Eugeniusza Romera, Warszawa-Wrocław 1991, s. 325.

## APPLICATION OF GEOLISP COMPUTER PROGRAM TO CREATE CARTOGRAPHIC DOCUMENTATION OF OPENCAST MINING PLANT

### Summary

In this article was shown the 'Geolisp' system of numerical mining maps, taking into account an outcrop module. There have been discussed the subsequent functions of this module and a possibility of its use in creation of cartographic documentation in an opencast mining. There have been shown the ways of mining maps creation on the basis of the measuring data, in the first part of this article. The insertion methods of contractual signs, lines and crosshatchings were especially demonstrated here. Then it has been presented how to convert the created maps, inter alia: maps transformation between the coordinate systems, preparation of figures to printing and creation of derivative maps. In the article were discussed the main functions of 'Geolisp' program, namely: calculation of heaps volume, making of diagrams and profiles, and Triangular Irregular Networks based on created maps of mining excavations. These surfaces can be obtained from the contour lines or the altitude and situational coordinates of coal bed roof/floor juxtaposed in the text files. These surfaces enable to do a visualization of coal bed elements and plan the next mining works. It was also shown how to make a thematic map based on created topology. In this part of an article have been described the subsequent steps of parcels making and a control of their topology, and also the way of parcels report generating. It has been presented the module, which can be used to production preparation. The end of this article is focused on the practical examples of the use of cartographic documentation.

**Keywords:** opencast mining, numerical maps, mining maps, numerical deposit model, volume calculation

*Przesłano do redakcji: 24.08.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 15.12.2017 r.*



## Informacje dodatkowe

1. Lista recenzentów współpracujących będzie opublikowana w czwartym numerze *Czasopisma Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*: 64(4/17) oraz na stronie internetowej:  
[www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/](http://www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/)  
(dotychczasowa nazwa: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*), strona internetowa:  
[www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/budownictwo-i/](http://www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/budownictwo-i/)
2. Zasady recenzowania są udostępnione na stronie internetowej:  
[www.oficyna.prz.edu.pl/zasady-recenzowania/](http://www.oficyna.prz.edu.pl/zasady-recenzowania/)
3. Informacje dla autorów artykułów są udostępnione na stronie internetowej:  
[oficyna.prz.edu.pl/informacje-dla-autorów/](http://oficyna.prz.edu.pl/informacje-dla-autorow/)
4. Formularz recenzji jest udostępniony na stronie internetowej:  
[www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/](http://www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/)
5. Instrukcja dla autorów omawiająca szczegółowo strukturę artykułu, jego układ, sposób przygotowywania materiału ilustracyjnego i piśmiennictwa jest zamieszczona na stronie internetowej:  
[www.oficyna.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorów/](http://www.oficyna.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorow/)  
oraz  
[www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/](http://www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/) w zakładce „Instrukcja dla autorów”
6. Dane kontaktowe do redakcji czasopisma, adresy pocztowe i e-mail do przesyłania artykułów oraz dane kontaktowe do wydawcy są podane na stronie internetowej (Komitet Redakcyjny):  
[www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/](http://www.oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/)

Zasady recenzowania, informacje dla autorów, formularz recenzji, instrukcja dla autorów i dane kontaktowe do redakcji czasopisma i wydawcy będą również opublikowane w czwartym numerze *Czasopisma Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, z. 64 (4/II/2017).