

prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński<sup>1)</sup>  
 ORCID: 0000-0002-0639-7534  
 mgr inż. Marek Drzazga<sup>2)</sup>  
 dr inż. Michał Drzazga<sup>3)\*</sup>  
 ORCID: 0000-0002-9989-7123  
 dr inż. Maciej Kaźmierowski<sup>3)</sup>  
 ORCID: 0000-0002-8977-4154

# Awaria silosu żelbetowego – projekt przebudowy z wykorzystaniem elementów technologii BIM

## *Failure of a reinforced concrete silo – reconstruction project using elements of BIM technology*

DOI: 10.15199/33.2022.07.12

**Streszczenie.** W artykule opisano awarię żelbetowego stropu silosu na śrutę rzepakową. Omówiono przyczyny oraz zakres uszkodzeń. Na podstawie rozwiązań technologii BIM (ang. *Building Information Modelling*) przedstawiono główne elementy projektu przebudowy konstrukcji silosu obejmujące demontaż uszkodzonej części oraz wykonanie nowej.

**Słowa kluczowe:** awaria; silos; BIM; projekt.

**Abstract.** The article describes a case study of a failure of reinforced concrete ceiling of a rapeseed meal silo. The causes and extent of damage are discussed. On the basis of BIM technology (*Building Information Modelling*) the main elements of the project of reconstruction of silo's structure are presented, including disassembly of the damaged part and making a new one.

**Keywords:** accident; silos; BIM; project.

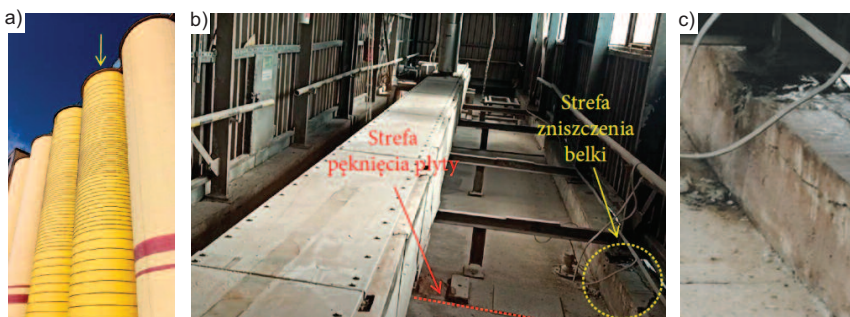
Technologia BIM, czyli modelowanie informacji o obiektach budowlanych, umożliwia tworzenie złożonych, n-wymiarowych modeli opisanych parametrami w zakresie planowania, projektowania, wykonania oraz eksploatacji obiektów budowlanych [1]. Dotyczy to również projektów przebudowy obiektów przemysłowych, które uległy awarii. Awarie silosów występują znacznie częściej niż innych obiektów przemysłowych [2]. Jest to silnie związane z wpływem składowanego materiału na jego konstrukcję zarówno podczas załadunku, jak i rozładunku [3]. Płynny przepływ materiału sypkiego zależy m.in. od występowania: przesklepiania się materiału; nawisów i tuneli w komorze oraz stref stałego zalegania materiału. Przyczyny tych zjawisk warunkują w dużym stopniu: właściwości składowanego materiału (uziarnienie, wilgotność); okres przechowywania; geometria komory (smukłość, parametry leja i otworu wysypowego) oraz zastosowane urządzenia wspomagające opróżnianie. W artykule opisano studium przypadku awarii

stropu silosu oraz przedstawiono zastosowanie technologii BIM w projekcie przebudowy silosu (strop i galeria).

### Opis konstrukcji

Bateria silosów wybudowana została na początku lat siedemdziesiątych XX wieku z pięciu monolitycznych, żelbetowych, cylindrycznych komór (fotografia). Komory o wysokości 38 m z dnem lejowym, średnicy zewnętrznej 9,2 m, grubości ściany 0,4 m napełniane przez taśmociągi, przeznaczone są do składowania śruty rzepakowej. Przekrycie komór stanowi strop z płyt korytkowych, oparty na dolnych półkach teowych prefabrykowanych belek żelbetowych o przekroju 45 x 60 cm (szerokość środnika 25 cm, grubość pół-

ki 15 cm). Belki o rozpiętości 8,45 m, długości całkowitej 9,94 m, rozstawie 3,25 m, wykonane z betonu o wytrzymałości na ściskanie 200 ATM ( $\approx 20$  MPa), zbrojone są prętami 6  $\phi$  18 (strefa rozciągana) i 2  $\phi$  14 (strefa ściskana) o granicy plastyczności 4000 ÷ 4200 ATM (405 ÷ 425 MPa). Strop silosu obciążony jest redlerem oraz galerią. Konstrukcja galerii składa się z ram stalowych o rozstawie 2,2 m, w postaci słupów i belek o przekroju ceowym. Słupy połączono z belkami za pomocą blach węzłowych. Ramy galerii – w obrębie komory – zostały stężone w jednym z czterech pól i oddylatowane. Słupy galerii wsparte na żelbetowych belkach, wcześniej scharakteryzowanych. Dach jednospadowy wykonany z blachy trape-



**Bateria silosów: a) widok ogólny z zaznaczeniem awarii komory; b) uszkodzenia stropu; c) zmiążdżenie betonu w belce**

*Silo battery: a) general view with indication of chamber failure; b) ceiling damage; c) crushing of concrete in a beam*

<sup>1)</sup> Expertus BRB Mieczysław Kamiński

<sup>2)</sup> KONSTRUKTOR group Sp. z o.o.

<sup>3)</sup> Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu; Katedra Budownictwa

\* Adres do korespondencji:

michal.drzazga@upwr.edu.pl

zowej, oparty na belkach o rozstawie 1,1 m; ściany osłonowe również z blachy trapezowej. W stropie zastosowano cztery kominy odpowietrzające. Urządzenia technologiczne podtrzymywane przez dwie stalowe dwuteowe belki, połączono za pomocą płaskowników przyspawanych do pasów górnych.

## Opis i przyczyny awarii

W czasie użytkowania jednej z komór silosu nastąpiła awaria konstrukcji stropu (fotografia), która obejmowała pęknięcie płyty stropowej (fotografia b) oraz zmiążdżenie strefy ściskanej betonu w przęśle belki (fotografie b i c). Na skutek znacznych deformacji stropu połączenie słupa galerii z belką zostało utracone. Ze względów bezpieczeństwa oględziny belek nie były prowadzone od strony wewnętrznej komory, dlatego też nieznaną był obraz zniszczeń w strefie rozciąganej belek.

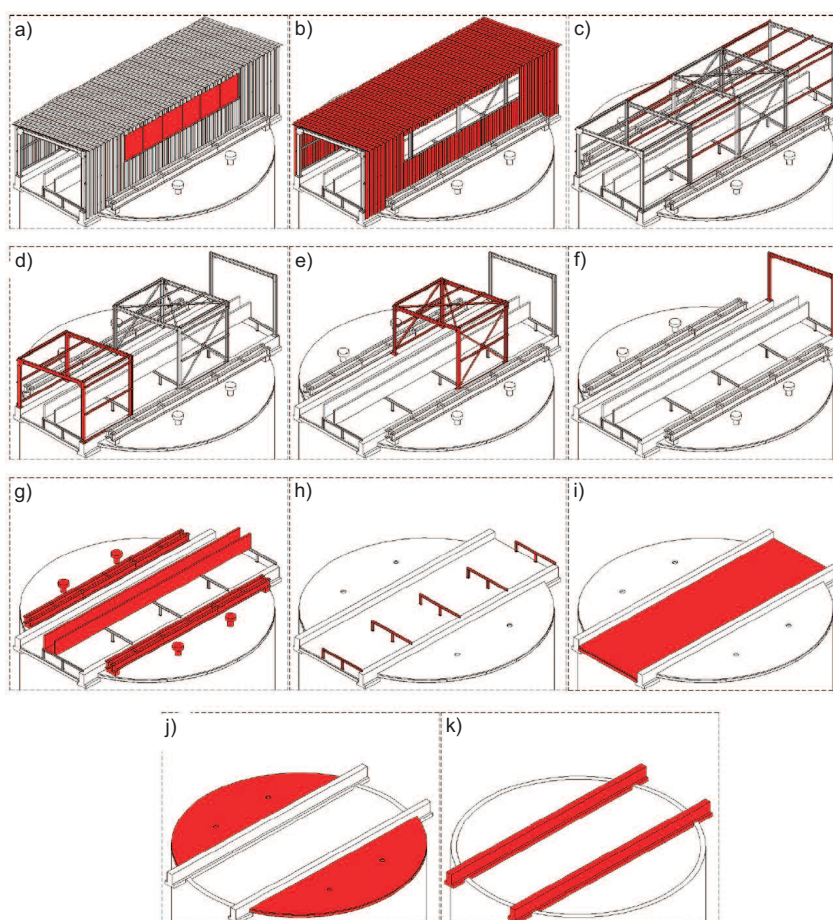
Bezpośrednią przyczyną awarii stropu było samoistne oberwanie nawisu śrutu, w wyniku którego powstało podciśnienie o sile skierowanej pionowo w dół komory (pomimo wykonania urządzeń odpowietrzających). Powstałe obciążenie doprowadziło do przekroczenia nośności stropu. Nawisy w silosach mogą występować w formie przesklepień bądź luków, które w momencie autogenicznego lub indukowanego oderwania wywołują znaczne podciśnienie [4, 5]. Dzieje się tak, ponieważ po oberwaniu łuku objętość powietrza w przestrzeni pod stropem komory zwiększa się do wartości końcowej w przybliżeniu równej objętości powietrza poniżej i powyżej łuku przed oberwaniem. Powstałe podciśnienie ulega po pewnym czasie wyrównaniu z ciśnieniem atmosferycznym pod warunkiem właściwie zaprojektowanych i eksploatowanych urządzeń odpowietrzających. Podciśnienie w części podstropowej silosu jest tym większe, im większe jest wypełnienie silosu i im wyżej tworzy się łuk nad lejem wysypowym. Często przyczyną tworzenia się nawisów jest zbrylanie materiału sypkiego na skutek zawilgocenia. Nawet przy małej zawartości wilgoci w materiale może dojść do zbrylania i wysklepiania, jeśli czas przechowywania materiału w bezruchu w komorze jest wystarczająco długi. Czas przestoju materiału, po którym następuje jego zbrylanie lub wysklepianie, jest tym krótszy, im bardziej materiał jest wilgotny. In-

nym czynnikiem mającym wpływ na szybkość zbrylania i wysklepiania jest nacisk konsolidacyjny składowanego materiału. Poziom tego ciśnienia wpływa również na stopień kohezji i kąt tarcia wewnętrznego [4].

## Zastosowanie rozwiązań BIM w projekcie przebudowy

Na podstawie przeprowadzonych oględzin stwierdzono dużą skalę oraz zakres uszkodzeń stropu. Naprawa i wzmocnienie uszkodzonej konstrukcji okazały się wątpliwe pod względem techniczno-ekonomicznym. Zdecydowano o konieczności wykonania projektu przebudowy stropu oraz galerii. W pierwszym etapie opracowano projekt rozbiór-

ki galerii i stropu, a w drugim – projekt przebudowy. Do wykonania projektów wykorzystano rozwiązania BIM, polegające na sporządzeniu modeli 3D w programie Autodesk Revit. Projektowanie z wykorzystaniem BIM polega na tym, że każdemu obiektowi przyporządkowuje się wiele parametrów, m.in. charakterystyk materiałowych, geometrycznych oraz związanych np. z harmonogramem wykonania i realizacji projektu [1]. Nadanie odpowiednich parametrów fazowania w przedmiotowym modelu umożliwiło przedstawienie toku postępowania przy prowadzeniu prac rozbiórkowych (rysunek 1) oraz wykonywaniu nowej konstrukcji (rysunek 2). Na podstawie modelu 3D ustalono również ma-



**Rys. 1.** Etapy demontażu galerii i stropu silosu (wypelnienie oznacza demontowany element): a) okna; b) blacha trapezowa; c) płatwie i rygle; d) sekcja 1 (4 słupy, 2 rygle, 4 płatwie i 6 rygli ściennych); e) sekcja 2 (4 słupy, 2 rygle, 4 płatwie, 6 rygli ściennych, stężenie polaciowe oraz międzysłupowe); f) sekcja 3 (2 słupy, 1 rygiel); g) urządzenia odpowietrzające, belki podtrzymujące urządzenia, redler; h) podkonstrukcja redlera; i-j) strop komory; k) belki stropowe

*Fig. 1. Gallery and silo ceiling disassembly steps (fill indicates item being disassembled): a) windows; b) trapezoidal sheeting; c) purlins and rafters; d) section 1 (4 columns, 2 rafters, 4 purlins and 6 wall rafters); e) section 2 (4 columns, 2 rafters, 4 purlins, 6 wall rafters, slope bracing and inter-pillar bracing); f) section 3 (2 columns, 1 rafter); g) ventilation equipment, equipment support beams, redler; h) redler substructure; i-j) chamber floor; k) floor beams*



sę poszczególnych elementów, na podstawie której dobrano urządzenia transportowe.

Nowo projektowaną konstrukcję galerii stanowią ramy złożone z rygli dachowych oraz słupów (rozstaw 2,44 m). W płaszczyźnie układu założono sztywne połączenie rygiel-słup i przegubowe – połączenie podstaw słupów. Ramy

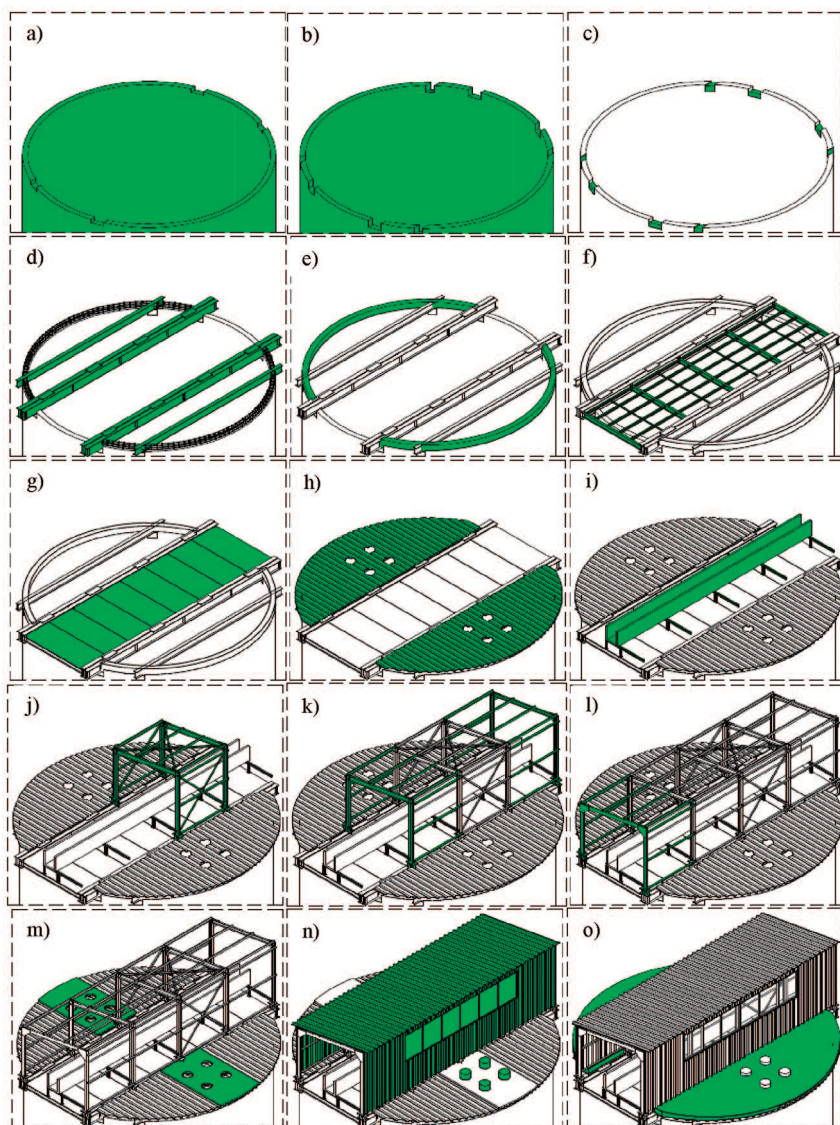
stężono w kierunku podłużnym poprzecznym stężeniem połączonym oraz stężeniami międzysłupowymi. Zaprojektowano rygle dachowe (rozpiętość 3,25 m) oraz słupy w ramach wewnętrznych i zewnętrznych odpowiednio z kształtowników CE180 i CE140 stal S235 (wysokość niższego słupa – 2,43; wyższego – 3,00 m). Jako podpory obudowy ścian galerii

i okien przyjęto rygle ściennie z kształtowników C65, o rozpiętości równej rozstawowi ram głównych (2,44 m) i rozstawie 1,30 m. Obudowę dachu zaprojektowano z trójprzęsłowej blachy trapezowej T55 grubości 1,00 mm, układanej na negatyw. Obudowę wsparto płatwiami jednoprzęsłowymi z kształtowników C65 o rozpiętości równej rozstawowi ram głównych (2,44 m) i rozstawie 1,10 m.

Konstrukcję stropu w obszarze galerii zaprojektowano z belek stalowych złożonych z dwóch dwuteowników IPE360 stal S235 o długości 9,8 m i rozpiętości w osiach podpór 8,4 m. Na belkach zaplanowano ruszt z belek IPE180 (rozpiętość 3,25 m, rozstaw 2,44 m) oraz belek IPE80 (rozpiętość 2,44 m, rozstaw 0,6 m). Zewnętrzną warstwę stropu stanowi blacha żeberkowa o grubości 6 mm stal S235, złożona z arkuszy o wymiarach 1,22 x 3,00 m w układzie pięcioprzęsłowym.

Konstrukcję stropu w obszarze poza galerią zaprojektowano jako dwuprzęsłową płytę, układaną na pozytywie z blachy trapezowej T55 grubości 1 mm. Ze względu na konieczność wzmocnienia blachy trapezowej w miejscu planowanych otworów odpowietrzających (kłapy bezpieczeństwa) zaprojektowano lokalnie płytę żelbetową grubości 6,5 cm (wykonana na blasze trapezowej). Płyta żelbetowa z betonu C25/30 zbrojona jest prętami  $\phi 16$  w fałdach i siatką  $\phi 6$  188/188 górą. Podporę pośrednią blachy trapezowej zaprojektowano z belek IPE270 o rozpiętości w osiach podpór 6,7 m. Na rysunku 2 przedstawiono wybrane etapy wykonania nowo projektowanej konstrukcji.

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wykonano za pomocą programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional z wykorzystaniem wydzielonego przestrzennego modelu konstrukcji. Wraz z tworzeniem modelu geometrycznego w programie Autodesk Revit powstał jednocześnie model analityczny, który bezpośrednio eksportowano do programu obliczeniowego Autodesk Robot Structural Analysis Professional (rysunek 3).

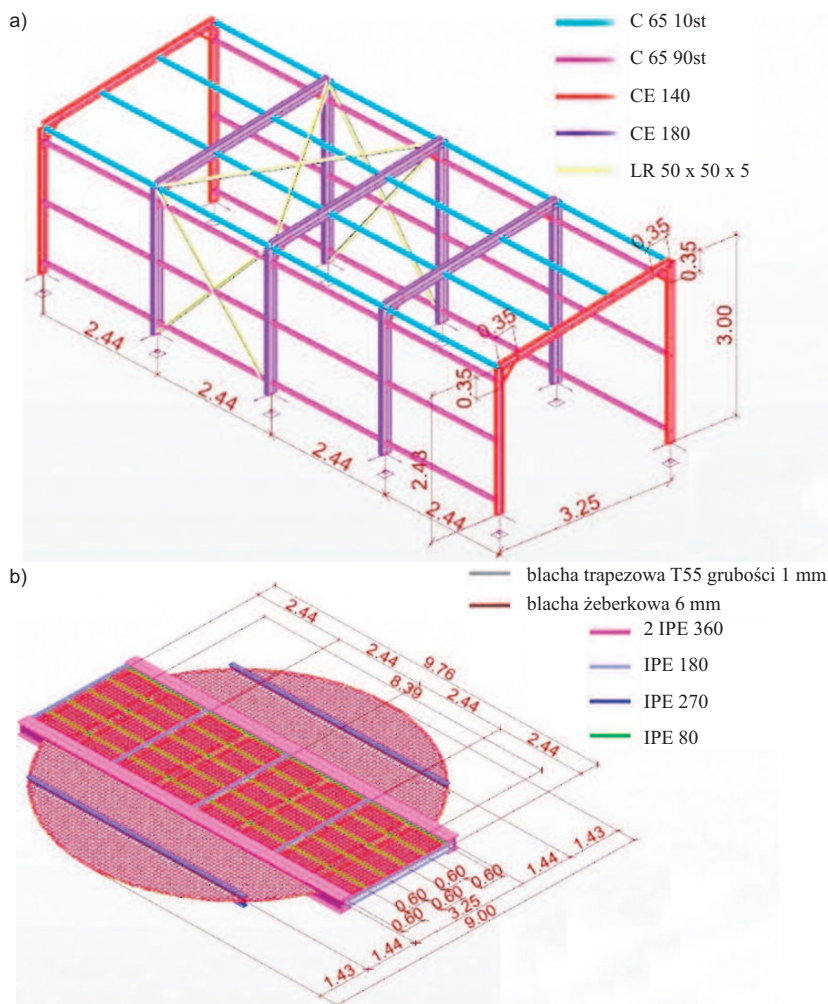


**Rys. 2. Etapy wykonania projektowanej konstrukcji:** a) stan po demontażu stropu; b) gniazda belek stropowych; c) zaprawa epoksydowo-mineralna pod belki stalowe; d) stalowe belki stropowe; e) wieniec na płaszczy silosu; f) ruszt w obszarze galerii; g) blacha żeberkowa w obszarze galerii; h) blacha trapezowa stropu w obszarze poza galerią; i) redler wraz z podkonstrukcją; j-l) konstrukcja galerii – sekcja 1÷4; m) płyta monolityczna na blasze trapezowej; n) obudowa galerii oraz instalacja urządzeń odpowietrzających na stropie silosu; o) warstwy wykończeniowe stropu silosu

*Fig. 2. Stages of execution of the designed structure:* a) state after disassembly of the ceiling; b) sockets of ceiling beams; c) epoxy-mineral mortar under steel beams; d) steel ceiling beams; e) rim on silo jacket; f) grate in the gallery area; g) ribbed sheeting in the gallery area; h) trapezoidal sheeting of the ceiling in the area outside the gallery; i) redler with subconstruction; j-l) structure of the gallery – section 1÷4; m) monolithic slab on the trapezoidal sheet; n) housing of the gallery and installation of venting devices on the silo ceiling; o) finishing layers of the silo ceiling

## Podsumowanie

Bezpośrednią przyczyną awarii silosu było samoistne oberwanie się nawisu śruły rzepakowej, w wyniku którego



Rys. 3. Modele obliczeniowe: a) konstrukcji galerii; b) konstrukcji stropu silosu  
 Fig. 3. Calculation models for: a) gallery structure; b) silo floor structure

powstało znaczne podciśnienie, które doprowadziło do przecięcia, a w konsekwencji do uszkodzenia elementów konstrukcyjnych stropu komory. Zastosowane rozwiązania technologii BIM w projekcie przebudowy umożliwiły przedstawienie faz realizacji przedsięwzięcia budowlanego, czyniąc dokumentację transparentną dla każdego uczestnika procesu budowlanego oraz eliminując błędy w interpretacji. Dzięki technologii BIM klient otrzymał przestrzenny model obiektu, w którym – w razie potrzeby – może przeanalizować wpływ różnych zmian na ogólny stan projektu i koszty. Eksport modelu geometrycznego 3D do programów obliczeniowych przyspiesza budowę modelu analitycznego, sprawia, że proces projektowania jest szybszy, a w konsekwencji mniej kosztowny. Przedstawiony projekt stanowi przykład wykorzystania technologii BIM w procesie bu-

dowlanym do opracowania projektu demontażu oraz przebudowy. **Proces BIM umożliwia definiowanie i zarządzanie informacją zarówno w przypadku budynków nowo wznoszonych, jak i przebudowywanych.**

#### Literatura

- [1] Drzazga M. BIM – zapis informacji o przedsięwzięciu budowlanym (projektowanie 5D). Przegląd Bud. 2016; t. 87, 9: 33 – 37.
- [2] Carson JW, Holmes T. Silo failures: why do they happen. TASK Q. 2003; t. 7, 4: 499 – 512.
- [3] Prusiel JA. Analiza naprężeń termicznych w żelbetonowych ścianach silosów na zboże. Mater. Bud. 2015; 9: 55 – 56, doi: 10.15199/33.2015.09.17.
- [4] Hotała E. Nośność graniczna nieuzębrowanych cylindrycznych płaszczy silosów stalowych. Pr. Nauk. Inst. Budownictwa Politech. Wroc. Monogr. Oficyna Wydawnicza Politech. Wroc. 2003; t. 83, 35: 166 – 166.
- [5] Bywalski C, Kamiński M. A case study of the collapse of the over-chamber reinforced concrete ceiling of a meal silo. Eng. Struct. 2019; t. 192: 103 – 112, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.100>.

Przyjęto do druku: 17.06.2022 r.



## SODASIL – TiO<sub>2</sub> Extender

- lepsze krycie, wzrost stopnia białości,
- obniżenie kosztów produkcji dzięki zmniejszeniu udziału TiO<sub>2</sub>



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: [arborcel@jrs.pl](mailto:arborcel@jrs.pl)