

Skanowanie laserowe stalowej konstrukcji elektrowni węglowej



dr inż.
WIESŁAW PACZKOWSKI
Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Budownictwa i Architektury
ORCID: 0000-0003-3228-9198



mgr inż.
SZYMON SKIBICKI
Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Budownictwa i Architektury
ORCID: 0000-0002-2918-7759



dr inż.
TOMASZ WRÓBLEWSKI
Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Budownictwa i Architektury
ORCID: 0000-0003-3731-1542

Artykuł przedstawia zastosowanie skaningu laserowego 3D jako uzupełniającego narzędzia oceny stanu technicznego złożonej stalowej konstrukcji szkieletowej modułu kotłowni elektrowni węglowej.

Polska opiera swoją gospodarkę energetyczną na elektrowniach węglowych. Wymagania dotyczące ochrony środowiska, w tym ochrony przed występowaniem kwaśnych deszczów, wymuszają stosowanie m.in. instalacji odsiarczania i odazotowania. Technologiczne usytuowanie instalacji odazotowania powoduje jej oddziaływanie na konstrukcję nośną kotłowni, wprowadzając do niej dodatkowe obciążenia. Wymaga to kompleksowej oceny skutków takich oddziaływań.

Praca dotyczy zastosowania skaningu laserowego 3D jako uzupełniającego narzędzia oceny stanu technicznego złożonej konstrukcji szkieletowej modułu kotłowni elektrowni węglowej. Moduł konstrukcji nośnej kotłowni obejmujący dwa bloki energetyczne stanowi wydzielony dylatacjami fragment o wymiarach w planie 72 m x 36 m oraz wysokości słupów nośnych 54,3 m, co daje kubaturę rzędu 140 tys. m³. W analizowanym obszarze podwieszono są dwa kotły o masie 3698 ton każdy. Kotły podwieszono są do rusztów opartych na wierzchołkach czterech słupów nośnych dla każdego kotła. Model numeryczny konstrukcji szkieletowej modułu kotłowni zawiera 1342 pręty i 499 węzłów, co wraz z węzłami nieważkich paneli usztywniających w obszarach występowania stropów daje całkowitą liczbę wszystkich węzłów 2118.

W ponad czterdziestoletnim okresie eksploatacji elektrowni doszło do znacznego nierównomiernego osiadania podłoża (lokalnie powyżej 20 cm) [1], w wyniku czego wystąpiły zauważalne uszkodzenia konstrukcji, m.in. wybożenia lub zerwania prętów pionowych. Konieczne stało się wprowadzenie wzmocnień przeciążonych elementów,

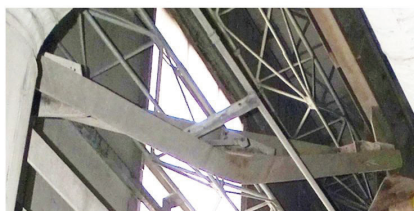
przy czym w pierwszej kolejności wzmocniono przeciążone słupy nośne. Część elementów stężeń świadomie pozostawiono bez wzmocnień, pozwalając im dostosować się do wymuszanych osiadaniem podłoża przemieszczeń poprzez uplastycznienie lub zerwanie prętów rozciąganych, a w przypadku prętów ściskanych – ich wybożenie. Takie podejście chroniło słupy nośne przed przeciążeniem. Rozłożony w czasie proces narastania przemieszczeń podłoża, towarzyszące mu pojawianie się kolejnych uszkodzeń, a także przebiegający w czasie proces wykonywania wzmocnień powodują, że analiza nośności konstrukcji w obliczu planów wprowadzenia dodatkowych obciążeń pochodzących od instalacji jest złożonym zagadnieniem inżynierskim.

Analiza numeryczna konstrukcji

Spośród siedmiu typów analiz konstrukcji wymienianych przez Eurokody zastosowano trzy: analizę liniowo-sprężystą (LA), analizę (fizycznie) materiałowo-nieliniową (MNA) oraz analizę geometrycznie i materiałowo-nieliniową (GMNA). Nie wprowadzono do analiz

imperfekcji określonych przez PN-EN 1993-1-1 [2], gdyż proponowane w normie zastępcze imperfekcje geometryczne mają charakter zbyt ogólny i znajdują zastosowanie przy projektowaniu nowych konstrukcji, a nie przy ocenie stanu technicznego konstrukcji istniejących. Źródłem imperfekcji, które wystąpiły w konstrukcji, było nierównomierne osiadanie podłoża (fundamentów słupów). Pomiary osiadania prowadzono z zastosowaniem tradycyjnych pomiarów geodezyjnych. Znana jest historia osiadań z ostatnich 30 lat funkcjonowania elektrowni.

Celem prowadzonych analiz było ustalenie stanu wyężenia oraz deformacji konstrukcji, uwzględniając wpływ przemieszczeń podłoża, zaistniałych uszkodzeń i zastosowanych wzmocnień. Prace prowadzono w związku z planem wprowadzenia nowych instalacji. Do czasu wykonania skaningu laserowego globalny stan deformacji przestrzennej układu ramowego był nieznan. Tradycyjne metody geodezji precyzyjnej nie nadawały się do jego określenia ze względu na niezwykle skomplikowane warunki w przestrzeni pomiarowej.



Rys. 1. Wybożony krzyżulec i jego obraz w obrabiałej graficznie chmurze punktów

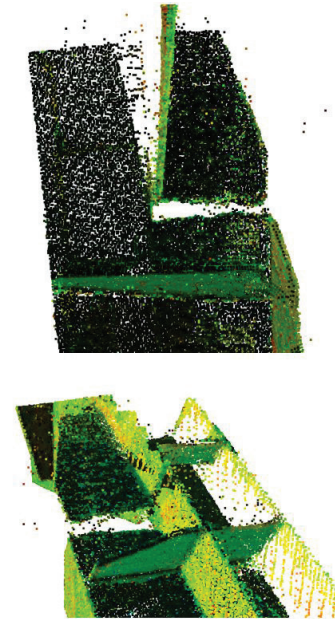
Analizy LA przeprowadzone z uwzględnieniem rzeczywistego stanu przemieszczeń podpór i aktualnego stanu uszkodzeń konstrukcji dawały nieakceptowalnie wysokie stopnie wyężenia elementów, co było efektem braku redystrybucji sił wewnętrznych. Przeprowadzenie analiz MNA ze sztywno-plastycznym modelem materiału pozwoliło na uwzględnienie korzystnego wpływu redystrybucji sił. Miało to duże znaczenie przy analizie zarówno głównych słupów nośnych, jak i stężeń pionowych w obszarze największych osiadań podłoża. Specyfiką kotłowni elektrowni węglowej jest podwieszenie kotłów o dużej masie na wierzchołkach słupów nośnych, co w zestawieniu z przechyłami powodowanymi przez nierównomierne osiadanie podłoża wymagało uwzględnienia efektów geometrycznie nieliniowych. Zastosowanie analizy GMNA związane było z wykonywaniem szeregu eksperymentów numerycznych pozwalających na uzyskanie zbieżności rozwiązania. Mimo dołożenia szczególnej staranności przy modelowaniu konstrukcji autorzy analiz mają świadomość, że uzyskane wyniki obciążone są znacznym stopniem niepewności ze względu na trudny do precyzyjnego zweryfikowania zestaw danych wejściowych.

Skaning laserowy konstrukcji

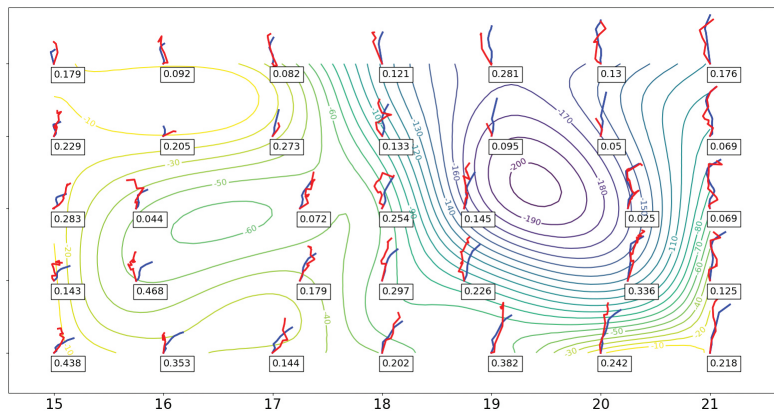
Skaning laserowy staje się coraz częściej stosowaną metodą inwentaryzacji geometrycznej konstrukcji [3]. Przykładem zastosowania skaningu do określenia geometrii złożonego i trudnego do pomiaru tradycyjnymi metodami obiektu inżynierskiego jest praca [4] dotycząca radiowej wieży Szuchowa w kształcie wielosegmentowej hiperboloidy obrotowej o wysokości 160 m. W pracy [5] pokazano możliwość wykorzystania skaningu laserowego do pomiaru imperfekcji konstrukcji rzeczywistych, co w przypadku omawianego w niniejszym artykule obiektu stanowi poważny problem.

Skaning laserowy konstrukcji wykonano za pomocą zespołu skanerów laserowych Leica ScanStation P40. System pomiaru odległości skanera wykorzystuje ultraszybką metodę impulsową opartą na pomiarze czasu przejścia impulsu lasera wspomaganą przez technologię WFD (ang. *The Wave Form Digitizer* – Digitalizacja Kształtu Fali) [6]. Dokładność pojedynczego pomiaru odległości wynosi 1,5 mm + 10 ppm (ang. *Parts Per Million*, [10⁻⁶]), natomiast dokładność kątowna wynosi 8" w poziomie oraz 8" w pionie. Szybkość skanowania wynosi do 1 000 000 punktów na sekundę. Skaner oraz pionownik laserowy są wyposażone w laser klasy 1 zgodnie z normą IEC 60825:2014 [6].

Wykonany skaning laserowy 3D dał chmurę punktów (w wersji skompresowanej zajmuje ona około 460 GB) obejmującą prawie w całości wszystkie elementy konstrukcyjne



Rys. 2. Zerwane połączenie rozciąganego pręta stężenia i jego obraz z chmury punktów



Rys. 3. Rzut na płaszczyznę poziomą (x, y) deformacji osi słupów nośnych uzyskanych z analizy GMNA (niebieskie) oraz z obróbki chmury punktów (czerwone)

występujące w modelu numerycznym. W ten sposób uzyskano informację dotyczącą aktualnej geometrii konstrukcji, co pozwoliło na przeprowadzenie szeregu analiz porównawczych obiektywizujących uzyskane drogą obliczeń numerycznych i przeglądu konstrukcji wyniki. Objęły one:

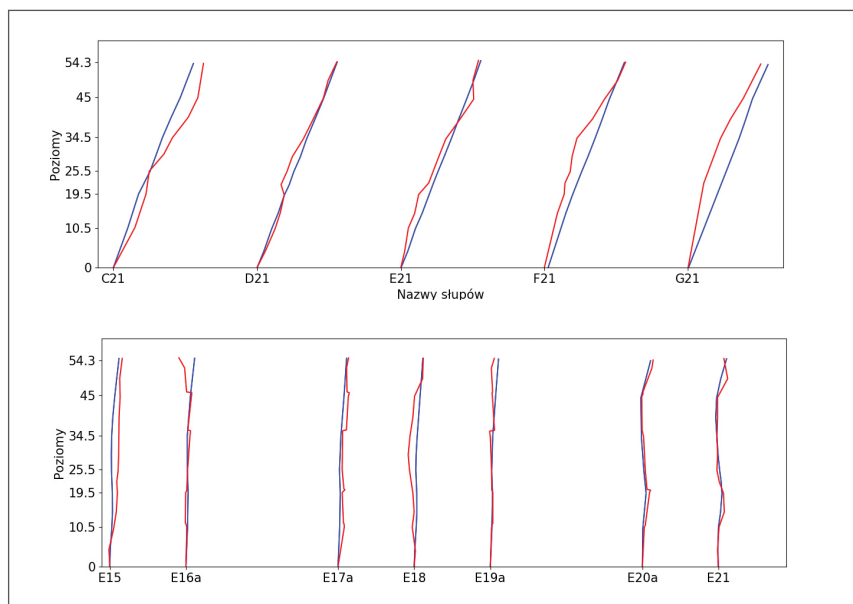
- morfologię konstrukcji, co przy jej złożoności stanowiło ważny czynnik weryfikujący;
- szczegółową inwentaryzację przekrojów elementów prętowych;
- stan globalnej deformacji konstrukcji uzyskany na drodze analiz GMNA zestawiony z rzeczywistym stanem deformacji (patrz p. 4.);
- szczegółową inwentaryzację geometrii wyoboczonych prętów pozwalającą na oszacowanie ich sztywności osiowej (rys. 1.);
- szczegółową inwentaryzację geometrii innych wyoboczonych elementów konstrukcyjnych (np. blach węzłowych lub stężeń typu X) pozwalającą na oszacowanie ich sztywności;

■ szczegółową inwentaryzację uszkodzeń prętów rozciąganych (zazwyczaj niedostępnych w przeciętnych warunkach standardowego przeglądu konstrukcji) umożliwiającą oszacowanie sztywności osiowej oraz śledzenie w czasie zmienności istotnych parametrów geometrycznych uszkodzenia (rys. 2);

■ praktycznie nieosiągalną innymi metodami informację o skrętnej deformacji słupów ściskanych pozwalającą na szacowanie nośności z uwzględnieniem stateczności skrętnej;

■ informację o stanie zdeformowanej konstrukcji pozwalającą na precyzyjne projektowanie elementów wzmacniających oraz pozbawione niepewności dopasowanie w budowywanej konstrukcji nośnej instalacji odazotowania.

Każde z wymienionych zagadnień zostało poddane analizie jakościowej oraz ilościowej. Ograniczona pojemność niniejszego artykułu uniemożliwia szczegółowe przedstawienie



Rys. 4. Porównanie deformacji słupów pionowych w osi 21 (a) oraz w rzędzie E (b) z analizy GMNA (niebieskie) i z obróbki chmury punktów (czerwone)

Tab. 1. Porównanie deformacji wybranych słupów

Słup	SKANING LASEROWY			Analiza GMNA			z_j [-]
	$S_{x,54,3}$ [m]	$S_{y,54,3}$ [m]	wypadkowa [m]	$r_{x,54,3}$ [m]	$r_{y,54,3}$ [m]	wypadkowa [m]	
D21	0,014	0,200	0,200	0,056	0,201	0,209	0,125
E18	0,043	0,135	0,142	0,041	0,130	0,136	0,254
C15	0,014	0,100	0,101	0,072	0,061	0,094	0,438
E20	0,051	0,179	0,186	0,039	0,184	0,188	0,025
E19	0,019	0,187	0,188	0,039	0,149	0,154	0,145
D20	0,053	0,209	0,216	0,056	0,184	0,192	0,336
E17	0,050	0,149	0,157	0,041	0,112	0,119	0,072
G15	0	0,091	0,091	0,004	0,059	0,059	0,180
F17	0,021	0,053	0,057	0,022	0,108	0,110	0,273
F16	0,045	0,019	0,049	0,002	0,040	0,040	0,205

wyników analiz poszczególnych pozycji. Dalej przedstawiono sposób podejścia oraz uzyskane wyniki dotyczące stanu globalnej deformacji konstrukcji.

Stopień zróżnicowania deformacji konstrukcji

Ze względu na sposób obciążenia analizowanej konstrukcji kotłami zawieszonymi na ruszcie opartym na wierzchołkach słupów nośnych wykazuje ona szczególną wrażliwość na efekty geometrycznie nieliniowe. W standardowym podejściu przy projektowaniu ram przechyłowych wpływ imperfekcji uwzględnia się za pomocą zastępczych imperfekcji, przede wszystkim w postaci wstępnej imperfekcji przechyłowej [2]. W niniejszej pracy przyjęto, że efekt imperfekcji normowych zostaje zastąpiony imperfekcjami rzeczywistymi spowodowanymi wychyleniem konstrukcji na skutek nierównomiernego osiadania podłoża. Stąd tak wielkiej wagi nabiera ocena

wiarygodności danych dotyczących globalnych deformacji konstrukcji. Ocenę tę oparto na stopniu zróżnicowania kształtu zdeformowanych słupów nośnych $z_j(1)$ określającego różnicę między kształtem uzyskanym na podstawie pomiarów laserowych i obliczeń numerycznych.

Do porównania wyników przemieszczeń wyznaczonych w modelu numerycznym GMNA z chmurą punktów otrzymaną przy pomocy skaningu laserowego wykorzystano stopień zróżnicowania $z_j(1)$ wektorów \vec{s}_j i \vec{r}_j opisujących stan danego słupa j . Wektory \vec{s} i \vec{r} stanowią odwzorowanie przemieszczeń słupa otrzymanych z modelu numerycznego (\vec{r}) oraz otrzymanych za pomocą skaningu laserowego (\vec{s}).

$$z_j = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot d_i^2)}{(\sum_{i=1}^n \alpha_i) \cdot d_{max}^2}, \quad (1)$$

gdzie:

$\alpha_i = \frac{h_i}{H}$ – waga, uwzględniająca wpływ poziomu, na którym występuje dane przemieszczenie;

h_i – wysokość do poziomu i słupa;

H – wysokość słupa;

$d_i^2 = (s_{x,i} - r_{x,i})^2 + (s_{y,i} - r_{y,i})^2$ – SED (squared Euclidean distance) pomiędzy współrzędnymi wektora na poziomie i ;

$d_{max}^2 = \max_j (\max_i d_{ji}^2)$ – maksymalne d_i^2 ,

przy czym $d_{max}^2 = 0$ wyklucza stosowanie (1);

$i = 1, \dots, n_j$ – indeks poziomów;

$j = 1, \dots, N$ – indeks słupów;

n_j – liczba poziomów w słupie j ;

$s_{x,i}, s_{y,i}, r_{x,i}, r_{y,i}$ – współrzędne wektorów kształtu \vec{s} i \vec{r} na poziomie i .

Globalne deformacje konstrukcji

Dalej zestawiono analityczną (tab. 1.) i graficzną (rys. 3., rys. 4.) prezentację wybranych parametrów stanu globalnych deformacji konstrukcji.

W tablicy 1. przedstawiono przemieszczenia poziome x i y wierzchołków wybranych słupów oraz ich wypadkową. W kolumnie z_j przedstawiono wartości współczynników zróżnicowania kształtu danych słupów obliczonych wg wzoru (1). Współczynnik z_j spełnia warunek $z_{j,min} = 0$ dla kształtów identycznych, a rośnie wraz ze zróżnicowaniem odchylek opisujących kształt słupa.

Na rys. 3. przedstawiono porównanie deformacji słupów w analizowanym module kotłowni. Kolorem niebieskim pokazano rzuty zdeformowanych osi słupów na płaszczyznę poziomą (x, y) uzyskane z analizy GMNA, natomiast kolorem czerwonym rzuty uzyskane ze skaningu laserowego. Obraz zdeformowanych osi słupów przedstawiono na tle warstwic ilustrujących stan deformacji podłoża wywołany jego nierównomiernym osiadaniem (warstwicę co 10 mm). Całość obrazu uzupełniono pokazanymi w ramach wartościami współczynników zróżnicowania kształtu z_j przypisanych poszczególnym słupom.

Na rys. 4. przedstawiono kształty słupów w osi 21 oraz w rzędzie E, stosując tę samą identyfikację kolorystyczną co na rys. 3. Słup E21 jest przedstawiony w obu rzutach, co daje pełną informację o jego kształcie.

Wnioski końcowe

Zastosowanie globalnego skanowania konstrukcji daje obraz jej geometrii, co przynosi liczne korzyści wymienione w punkcie 3., praktycznie niedające się osiągnąć innymi metodami. W szczególności uzyskano potwierdzenie wysokiej zgodności stanu deformacji konstrukcji określonego na podstawie analiz numerycznych oraz skaningu laserowego. Pozwoliło to nabrać zaufania do prowadzonych analiz numerycznych. Wpro-

wadzona miara zróżnicowania kształtu z_j potwierdza intuicyjnie odczuwane różnice. Stawowi ona próbę zobjekttywizowania miary niezgodności kształtów. Przewiduje się jej dalsze stosowanie w podobnego typu analizach.

Literatura:

- [1] Paczkowski W., Skibicki S., 2018, Przekiężenia stężeń stalowego szkieletu kotłowni spowodowane gradientem pola osiadań podłoża. „Materiały Budowlane”, nr 04, str. 50–51. 10.15199/33.2018.04.13.
- [2] PN-EN 1993-1-1. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków: 2006.
- [3] Ma Z., Liu S., 2018. A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications. “Advanced Engineering Informatics” 37, str. 163–174. 10.1016/j.aei.2018.05.005.
- [4] Leonov, A.V., Anikushkin, M.N., Ivanov, A.V., Ovcharov, S.V., Bobkov, A.E., Baturin, Y.M., 2015. Laser scanning and 3D modeling of the Shukhov hyperboloid tower in Moscow. “Journal of Cultural Heritage” 16, str. 551–559. 10.1016/j.culher.2014.09.014.
- [5] Feng P., Zou Y., Hu L., Liu T., 2019. Use of 3D laser scanning on evaluating reduction of initial geometric imperfection of steel column with pre-stressed CFRP. Engineering Structures 198, 109527. 10.1016/j.engstruct.2019.109527.
- [6] Leica ScanStation P30/P40. Specyfikacja techniczna, Leica Geosystems AG, Heerbrugg 2016.
- [7] Deza M.M., Deza E., Encyclopedia of Distances, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2009.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8793

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Paczkowski Wiesław, Skibicki Szymon, Wróblewski Tomasz, 2020, Skanowanie laserowe konstrukcji stalowej elektrowni węglowej. „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8793

Streszczenie: W pracy przedstawiono zastosowanie skaningu laserowego 3D jako uzupełniającego narzędzia oceny stanu technicznego złożonej stalowej konstrukcji szkieletowej modułu kotłowni elektrowni węglowej. W wyniku znacznego osiadania podłoża wystąpiły uszkodzenia konstrukcji obniżające jej poziom bezpieczeństwa. Do oceny stanu wytrzymałości i deformacji konstrukcji zastosowano ostatecznie analizę liniowo-sprężystą (LA) oraz analizę geometryczną i materiałowo nieliniową (GMNA). Wykonano skaningu laserowego 3D obejmujący prawie w całości wszystkie elementy konstrukcyjne występujące w modelu numerycznym. W ten sposób uzyskano informację dotyczącą geometrii oraz rzeczywistego stanu deformacji konstrukcji. W pracy porównano teoretyczny kształt deformacji słupów nośnych kotłowni z kształtem ustalonym na podstawie skaningu laserowego. Wprowadzono miarę zróżnicowania obu kształtów pozwalającą na ocenę stopnia ich zgodności.

Słowa kluczowe: skanowanie laserowe, stalowa konstrukcja nośna, osiadanie podłoża, elektrownia węglowa

Abstract: Laser scanning of a coal power plant steel structure
The paper presents the use of 3D laser scanning

as a complementary tool for quality assessment of the steel skeletal structure of a coal power plant module. As a result of significant soil subsidence, structural damage occurred that reduced its safety level. Linear elastic analysis (LA) as well as geometrical and materially non-linear analysis (GMNA) were used to assess the state of stresses and deformations of the structure. 3D laser scanning was performed covering almost all of the structural elements appearing in the numerical model. In this way, information on the current structure geometry was obtained, which allowed for a series of comparative analyses. The work summarizes the theoretical state of displacements of the columns with the state established by laser scanning. A measure of the dissimilarity of both shapes was introduced to assess the credibility of the analyzed data.

Key words: laser scanning, steel structure, soil subsidence, coal power plant

REKLAMA



BE SURE. BUILD SURE.

MC-Bauchemie sp. z o.o.
Krajowe Biuro Handlowe
ul. Wyścigowa 39
53-011 Wrocław
tel./fax: +48 71 339 77 44

www.mc-bauchemie.pl

MC-Bauchemie
Technologie bezwykopowej

renowacji przewodów
i studni kanalizacyjnych

The advertisement features a blue background with several hexagonal images showing various construction and renovation projects, including pipe relining, trenching, and structural work. The text 'MC-Bauchemie' is prominently displayed in a large, white, sans-serif font. Below it, the phrase 'Technologie bezwykopowej' (non-excavation technology) is written in a smaller, white font. At the bottom, the text 'renowacji przewodów i studni kanalizacyjnych' (renovation of pipes and sewerage wells) is written in a white font, following the curve of the images.