

# Wykorzystanie skaningu laserowego i chmur punktów na budowie. Część IV

## The use of laser scanning and point clouds on the construction site. Part IV

dr inż. Paweł Nowak (ORCID: 0000-0003-4748-0796), dr inż. Jerzy Rośton (ORCID: 0000-0002-7072-9564), Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, mgr inż. Karol Romatowski, STRABAG Sp. z o.o.

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4884

**Streszczenie:** Czwarty i ostatni z serii czterech artykułów na temat skaningu laserowego przedstawia wykorzystanie chmur punktów oraz skaningu na przykładach z rzeczywistej budowy. Przedstawiono studia przypadku – sposób kontroli bieżącego stanu robót oraz sprawdzania jakości wykonania posadzek betonowych w trakcie realizacji oraz analizę ugięcia konstrukcji stalowej. Artykuł prezentuje także zbiorcze podsumowanie całej serii. Autorzy przedstawili także projekty ERASMUS+, służące rozwojowi nowoczesnej dydaktyki inżynierów i menedżerów budowlanych: 3M site oraz CLOEMC VI.

**Słowa kluczowe:** innowacje, budownictwo, inwentaryzacja, skaningu laserowy, chmura punktów.

**Abstract:** The fourth and last in a series of four articles on laser scanning presents the use of point clouds and scanning on real-world examples. Case studies were presented – the method of controlling the current state of works and checking the quality of concrete floors during implementation, as well as the analysis of deflection of the steel structure. The article also presents a summary of the entire series. The authors also presented Erasmus+ projects that contribute to the development of modern didactics for construction engineers and construction managers: 3M site and CLOEMC VI.

**Keywords:** innovation, construction, inventory, laser scanning, point cloud.

## 1. Wprowadzenie

Niniejszy, czwarty artykuł, to podsumowanie serii, która ukazała się w „Przeglądzie Budowlanym” w 2022 roku. W pierwszym artykule [1] przedstawiono podstawowe informacje na temat skanerów laserowych oraz ich działania. Wyjaśniono, co wpływa na dokładność pomiarów instrumentami skanującymi i w jaki sposób odbywa się skanowanie. Przedstawiono także zagadnienie związane z wykorzystaniem skanerów do inwentaryzacji robót zanikowych i zakrywanych (zbrojenie i instalacje). W drugim artykule [2] przedstawiono podstawowe informacje na temat pracy z chmurą punktów. Przedstawiono także zagadnienie związane z wykorzystaniem skanerów do kontroli jakości robót budowlanych na przykładzie badania ugięć stropów. W trzecim artykule [3] autorzy przedstawili szereg problemów, jakie może napotkać skanujący i praktyczne sposoby ich rozwiązywania. Pokazano także możliwości wykorzystania skanera oraz chmury punktów do przedmiarowania oraz wykonywania obmiarów. Zamykający serię artykuł czwarty przedstawia praktyczne zasady pracy ze skanerem oraz chmurą punktów przy kontroli jakości wykonania posadzek betonowych w trakcie realizacji oraz analizy ugięcia konstrukcji stalowej.

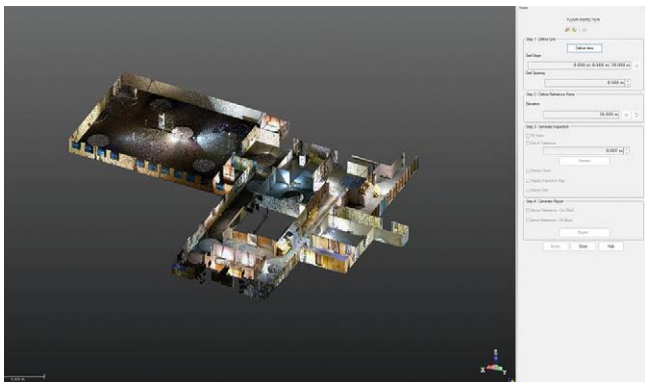
## 2. Kontrola jakości wykonywanych robót na budowie

### 2.1. Sprawdzanie jakości wykonanych posadzek cementowych

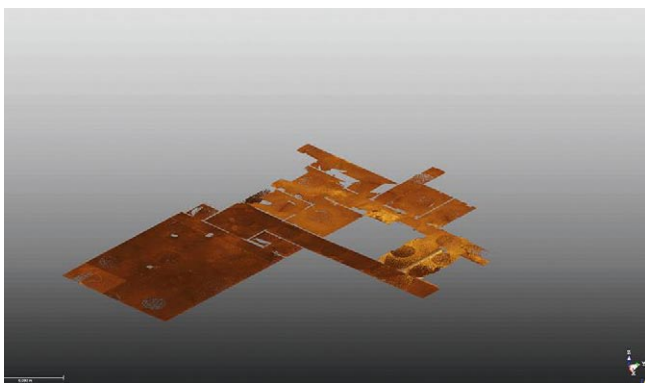
W trakcie prac budowlanych na kondygnacji +3 szpitala (projekt budowlany omówiony w poprzednich częściach artykułu [1, 2, 3]), czyli kondygnacji, na której znajdzie się nowoczesny oddział operacyjny, wykonywano skanowanie i tworzono chmury punktów w celu zebrania jak największej informacji o obiekcie. Jest to ogromna zaleta wykonywania skanowania laserowego w trakcie realizacji obiektu budowlanego. Utworzone chmury punktów, które pierwotnie miały posłużyć jako inwentaryzacja robót zanikowych i zakrywanych przy zamykaniu ścian gipsowo-kartonowych, wykorzystano do analizy płaskości, sprawdzenia poziomu wykonanych posadzek cementowych. W tym celu przygotowano dwie chmury punktów, które były wykonywane: bezpośrednio po wykonaniu posadzek cementowych na kondygnacji +3 oraz tuż przed przystąpieniem do prac związanych z zamykaniem ścian gipsowo-kartonowych. Chmury punktów zostały dowiązane do współrzędnych ustalonych w BEP. Pojedyncze skany zostały wyrównane względem siebie z milimetrową dokładnością jeszcze w terenie, a sprawdzone i doprecyzowane na stanowisku stacjonarnym w oprogramowaniu RealWorks.

### Przykład 1

Chmury punktów podzielono na mniejsze części. Wydzielono odpowiednio punkty tworzące strop, ściany, posadzki oraz inne elementy, takie jak instalacje czy składowane materiały na budowie, które także znalazły się w zakresie widzenia skanera laserowego i zostały zeskanowane (rys. 1 i 2).



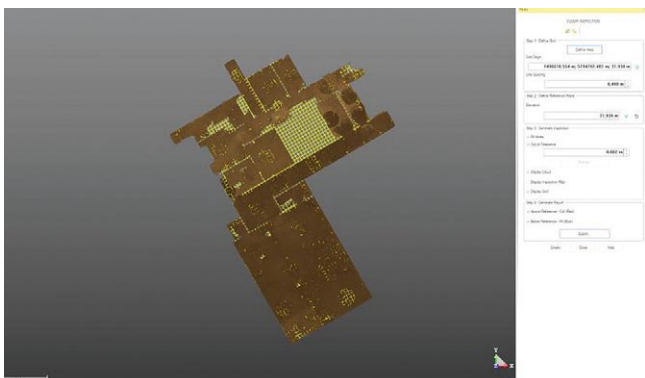
**Rys. 1.** Przykład 1 – ograniczony widok chmury punktów – poziom +3 (opracowanie własne)



**Rys. 2.** Przykład 1 – chmura punktów przedstawiająca posadzkę na poziomie +3 (opracowanie własne)

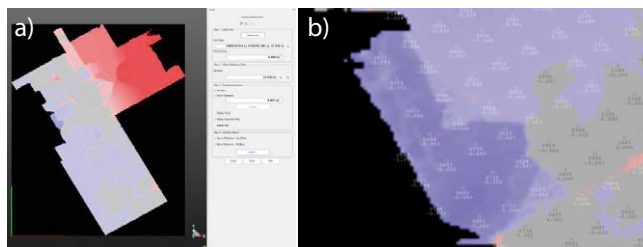
Po wyizolowaniu chmur punktów rozpoczęto pracę na chmurze punktów przedstawiającej posadzkę cementowe. Do analizy wykorzystano narzędzie Floor Inspection. Pracę rozpoczęto od wybrania obszaru chmury, która zostanie poddana inspekcji. Ustalono siatkę kwadratów do analizy o długości boku równej 0,4 metra i wybrano poziom referencyjny do analizy o współrzędnej Z = 31,93 (rys. 3).

Analizę wykonano dla całej posadzki zeskanowanej w projekcie oraz oddzielnie dla pomieszczenia pooperacyjnego dla pacjentów na kondygnacji +3, aby zweryfikować różnice w wynikach i sprawdzić jakość wykonania inspekcji posadzek. Do analizy ustalono odchyłkę w granicach tolerancji



**Rys. 3.** Przykład 1 – siatka kwadratów ustalona do analizy płaskości posadzki (opracowanie własne)

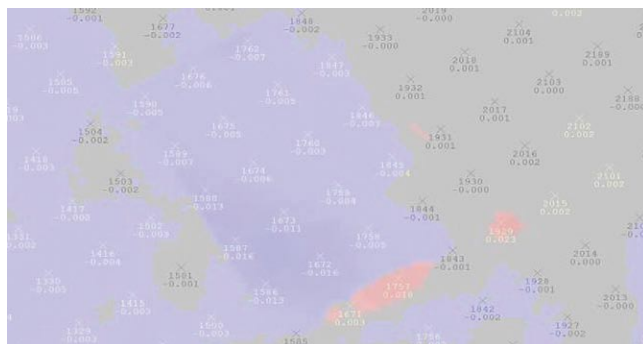
1 mm powyżej i 1 mm poniżej rzędnej referencyjnej. Na mapie inspekcji na rysunku 4a widać, że posadzki w większości pomieszczeń zostały zaznaczone kolorem szarym, co oznacza, że odchyłki od rzędnej referencyjnej są nie większe niż 1 mm. Dla stref niebieskich sprawdzono, jakie są różnice w poziomie posadzki. W pomieszczeniu pooperacyjnym stwierdzono, że posadzki zostały wykonane z dopuszczalną odchyłką, która w przyszłości zostanie zniwelowana przy użyciu wylewki samopoziomującej. Na rysunku 4b widać, że mapa inspekcji ma kolor niebieski o silnym nasyceniu i w tym miejscu różnice wysokości są znaczne, bo sięgają 8 cm. Jest to spowodowane tym, że w tym miejscu w momencie skanowania posadzki nie były jeszcze wykonane, a zeskanowana powierzchnia jest powierzchnią stropu żelbetowego, na którym układano posadzki cementowe. Jest to ciekawy przypadek pokazujący nie tylko dokładność wykonywanej analizy, ale pozwalający na ustalenie, gdzie posadzki zostały wykonane na danym etapie budowy.



**Rys. 4.** Przykład 1 – mapa inspekcji płaskości posadzki (a), punkty pomiarowe na mapie inspekcji płaskości posadzki (b) (opracowanie własne)

Na rysunku 5 widać, że mapa inspekcji zmienia kolor (z szarego na niebieski) oraz jego nasycenie. Patrząc na wyniki z analizy w danych punktach pomiarowych widać, że obniża się tam poziom posadzki. Jest to spowodowane wykonanym spadkiem w pomieszczeniu (w tym wypadku wpust, który ma zbierać wodę z pomieszczenia i odprowadzać ją do instalacji wykonanych w budynku).

Mapa inspekcji może zostać wykorzystana w celu weryfikacji spadków wykonywanych na budowie i sprawdzenia, czy dane zmiany poziomu zostały wykonane prawidłowo. W tym przypadku stwierdzono, że spadek został wykonany zgodnie z projektem. Na rysunku 6 widać, że mapa inspekcji



**Rys. 5.** Przykład 1 – obniżenie poziomu posadzki – spadek technologiczny do wpustu w posadzkę (opracowanie własne)

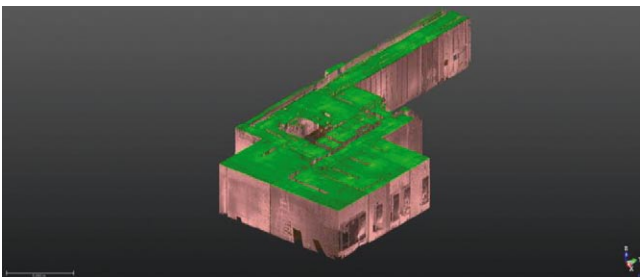
ma kolor czerwony z różnymi odcieniami czerwieni. W zeskanowanych korytarzach na łączniku budynku nowo projektowanego z budynkiem istniejącym szpitala przewidziano w projekcie zmianę wysokości posadzki. Mapa inspekcji pokazuje, że posadzki na łączniku mają inny poziom niż te w pozostałych pomieszczeniach. Zmiany wysokości zweryfikowano z projektem i stwierdzono, że zostały wykonane prawidłowo.



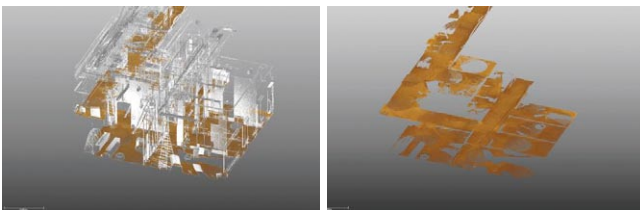
**Rys. 6.** Przykład 1 – zmiana wysokości posadzki na łączniku, wyrównanie poziomu posadzki z budynkiem istniejącym szpitala (opracowanie własne)

### Przykład 2

Takie same kroki wykonano także dla drugiej chmury punktów. Podzielono chmurę na mniejsze części zgodnie z widocznymi kolorami. Na zielono – strop, różowy kolor – ściany, brązowy – posadzki i szary – pozostałe elementy (rys. 7 i 8).



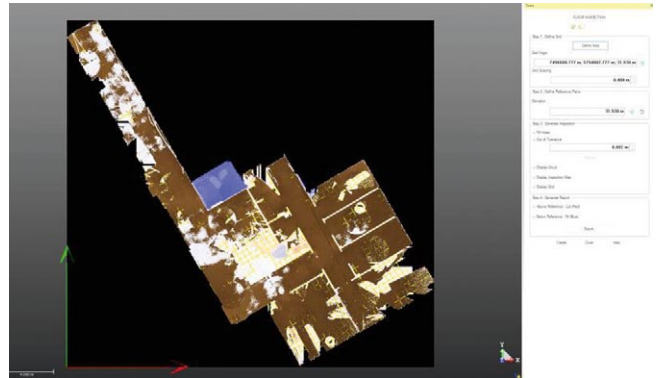
**Rys. 7.** Przykład 2 – chmura punktów z podziałem na elementy konstrukcyjne – poziom +3 (opracowanie własne)



**Rys. 8.** Przykład 2 – chmura punktów z wyłączonym stropem i ścianami – poziom +3 (a), chmura punktów przedstawiająca posadzkę na poziomie +3 (b) (opracowanie własne)

Wszystkie parametry potrzebne do ustalenia przy tworzeniu mapy inspekcji przyjęto jak dla poprzedniego projektu. Na mapie inspekcji na rysunku 9 i 10 pokazano, że posadzki w większości pomieszczeń zostały zaznaczone kolorem szarym, co oznacza, że odchyłki od rzędnej referencyjnej są nie

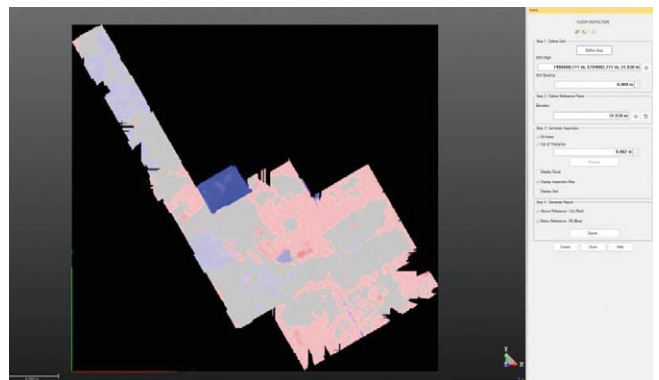
większe niż 1 mm. Kolor czerwony oznacza punkty znajdujące się powyżej rzędnej referencyjnej, na niebiesko punkty poniżej ustalonego poziomu  $Z=31,93$ .



**Rys. 9.** Przykład 2 – mapa inspekcji z nałożoną chmurą punktów (opracowanie własne)

Na rysunku 11 pokazano kolejno wyłączane fragmenty chmury punktów. Na zielono – strop, różowy kolor – ściany, brązowy – posadzki i szary – pozostałe elementy. Wyniki analizy pokazują, że rzędna wykorzystana zarówno przy analizie posadzki dla obu chmur punktów w dużej części są wykonane z milimetrową dokładnością. Te obszary zostały zaznaczone kolorem szarym. Jednakże zauważono odstępstwa od tej zasady i postanowiono dokładnie sprawdzić poszczególne części mapy inspekcji.

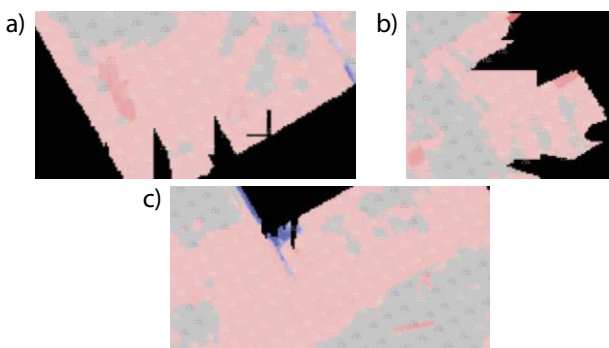
Sprawdzono czerwone oraz niebieskie obszary, aby zweryfikować, czy posadzka została wykonana w sposób umożliwiający wyrównanie poziomów za pomocą wylewek samopoziomujących w kolejnych etapach budowy.



**Rys. 10.** Przykład 2 – mapa inspekcji płaskości posadzki (opracowanie własne)

Pierwszy czerwony fragment pokazuje, że odchylenie od poziomu posadzki betonowej wynosi do 4 mm. Uznano, że nie trzeba posadzki dodatkowo wyrównywać metodami mechanicznymi, a wystarczy wylewka samopoziomująca pod warstwy wykończeniowe posadzek w budynku, aby uzyskać poziom. Na szczególną uwagę zasługiwały dwa miejsca na mapie inspekcji, które wyróżniały się dużą intensywnością nasycenia kolorami czerwonym i niebieskim.

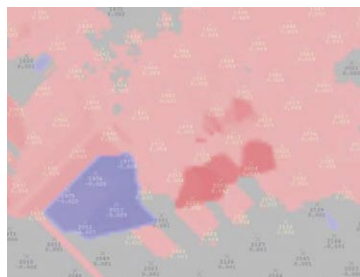




**Rys. 11.** Przykład 2 – pierwszy (a), drugi (b), trzeci sprawdzany fragment posadzki (c) (opracowanie własne)

Pierwszy przypadek znajdujący się w centrum mapy inspekcji (rys. 12) jest to miejsce, gdzie znajduje się szacht wentylacyjny, a pomimo to program wypełnił brakujące miejsca na rzucie chmury punktów. Te wyniki należy odrzucić, ponieważ, w tym miejscu nie była analizowana chmura punktów, a jedynie program wypełnił puste przestrzenie, które zostały uwzględnione podczas siatkowania. Podczas analizy mapy inspekcji wykonanej do sprawdzania poziomu posadzek cementowych należy odrzucać wszystkie punktowe odchyłki znacznie różniące się od rzędnej referencyjnej. W większości przypadków są one spowodowane znajdującymi się na budowie składowanymi materiałami, których nie udało się na etapie czyszczenia chmury punktów z tak zwanych „szmerów” usunąć.

**Rys. 12.** Szacht wentylacyjny na mapie inspekcji – wyniki niemiernodajne (opracowanie własne)



Na rysunku 13 natomiast widać, że poziom badanej powierzchni znajduje się niżej niż pozostała część badanej posadzki (około 10 cm). Z mapy inspekcji wynika więc, że posadzki cementowe w danym pomieszczeniu nie zostały jeszcze wykonane. Powodem było to, że w tym pomieszczeniu miała się znajdować winda towarowa, która miała łączyć blok operacyjny znajdujący się na analizowanym piętrze +3 z laboratorium, znajdującym się piętro niżej w tej samej lokalizacji. Wykonanie posadzek zostało zaplanowane na późniejszy etap budowy.

**Rys. 13.** Brak wykonanej posadzki w pomieszczeniu (opracowanie własne)



## 2.2. Analiza ugięcia konstrukcji stalowej i blachy trapezowej

Na omawianej budowie szpitala, pojawiły się wątpliwości związane z ugięciem się belek stalowych oraz blachy trapezowej na dachu na ostatniej kondygnacji. Na części dachu składowano materiały, które później miały zostać wykorzystane do wykonania warstw dachu na budynku. Materiał budowlany został złożony na niewielkiej przestrzeni i pojawiły się wątpliwości ze strony nadzoru, czy nie spowodowało to nadmiernego ugięcia blachy trapezowej oraz belek konstrukcji stalowej. Na panoramie wykonanej skanerem laserowym pokazano, jak wygląda konstrukcja na ostatniej kondygnacji obiektu (rys. 14).



**Rys. 14.** Panorama ze stanowiska pomiarowego podczas skanowania konstrukcji stalowej (opracowanie własne)

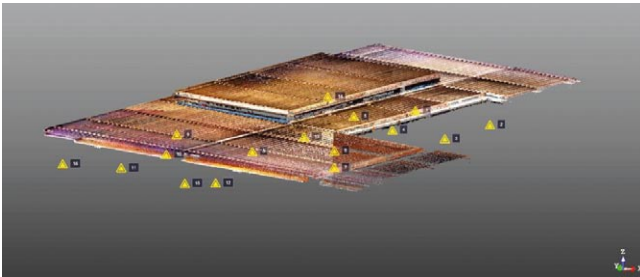
Głównymi elementami nośnymi, przekazującymi obciążenia, są belki oraz słupy stalowe. Jest to konstrukcja stalowa w postaci szkieletu prętowego, na którym ułożone zostały kolejne warstwy dachu. Postanowiono zbadać, czy możliwe jest za pomocą skanera laserowego sprawdzenie, czy nie zostały przekroczone dopuszczalne ugięcia konstrukcji oraz czy konstrukcja nie została uszkodzona. Stwierdzono, że znalezienie najniższego punktu danej belki można znaleźć w środku rozpiętości belek, które zostały obustronnie podparte. Takie podejście byłoby prawdopodobnie odpowiednie, jednakże autorzy wzięli pod uwagę fakt, że schemat statyczny sprawdzanej części dachu nie jest schematem belki obustronnie podpartej, ponadto konstrukcja nie była obciążona jednorodnie ani punktowo w taki sposób, aby można było łatwo przewidzieć najniższe punkty konstrukcji. Biorąc pod uwagę schemat statyczny oraz zmienne obciążenie składowanymi materiałami stwierdzono, że skanowanie i utworzenie chmury punktów powinno być wykonane jeszcze w trakcie obciążania konstrukcji materiałami. Dzięki temu można było sprawdzić, jakie było ugięcie konstrukcji i zlokalizować miejsca, gdzie ugięcie było największe. Skanowanie w terenie rozpoczęto w dniu, w którym pogoda sprzyjała wykonywaniu pomiarów, nie było wiatru ani opadów atmosferycznych. Zabezpieczono miejsce wykonywania skanowania, tak aby nie były w tym rejonie prowadzone prace budowlane. Zaplanowano i wykonano 16 skanów. Zeskanowano część, którą należało sprawdzić, a także fragment kondygnacji, na którym znajdowały się punkty georeferencyjne. Dzięki temu udało się

później dokładnie dowieźć chmurę punktów do współrzędnych budowy. Po wykonaniu skanowania przetworzono dane i przygotowano chmurę punktów do pracy (rys. 15). Kolejnym krokiem było dowiezienie chmury punktów do współrzędnych budowy. Wykonano więc georeferencję i wpasowano chmurę tak, aby pomiary konkretnych rzędnych z chmury punktów odpowiadały rzędnym na budowanym obiekcie. Następnie podzielono chmurę punktów, w taki sposób, aby uzyskać chmurę przedstawiającą jedynie belki stalowe oraz blachę trapezową.

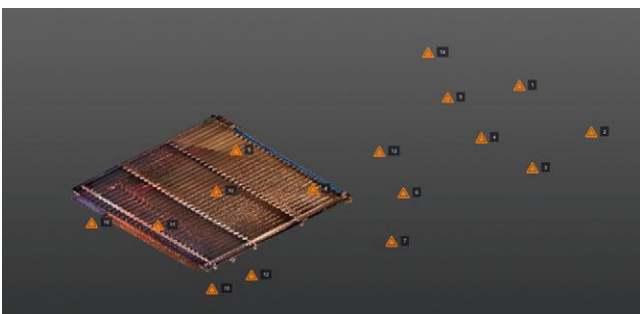
W kolejnych krokach dzielono chmurę punktów na mniejsze fragmenty, wydzielając same belki stalowe, część podniesioną oraz część dachu, która miała zostać sprawdzona pod względem dopuszczalnego ugięcia (rys. 16).

Dla tego fragmentu konstrukcji stalowej i dachu wykonano pomiary. Najpierw wykonano proste pomiary przy zablokowaniu rzędnej Z, aby sprawdzić odległość spodu belek stalowych od posadzek wylanych na kondygnacji (rys. 17).

To sprawdzenie miało na celu dodatkową kontrolę dowiezienia chmury punktów oraz szybkiego sprawdzenia w jakich rejonach może znajdować się punkt najniższy, czyli o największym ugięciu. Później przystąpiono do pracy, która polegała na opracowaniu map inspekcji dla belek stalowych 1–4 oraz dla blachy trapezowej.

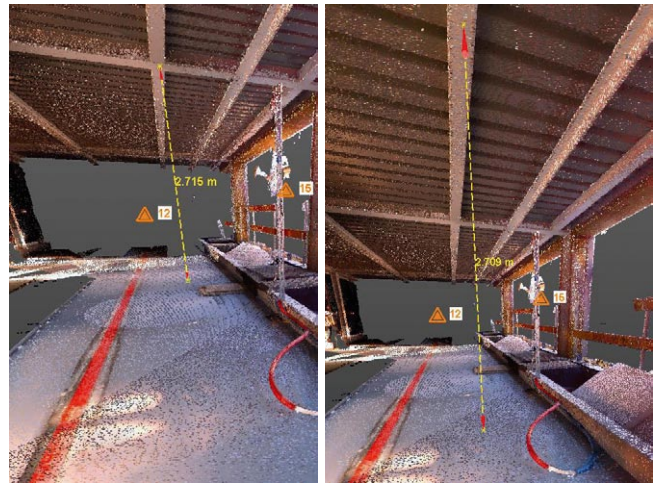


**Rys. 15.** Chmura punktów – konstrukcja stalowa i blacha trapezowa na ostatniej kondygnacji (opracowanie własne)

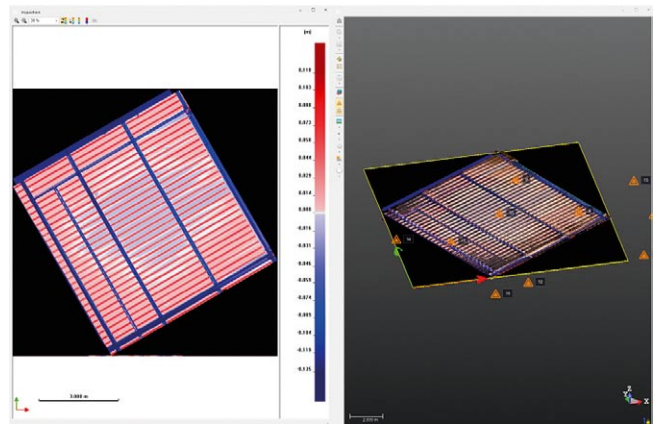


**Rys. 16.** Wycięty fragment chmury punktów do analizy ugięcia (opracowanie własne)

Najpierw wykonano mapę inspekcji w celu weryfikacji ugięcia blachy trapezowej (rys. 18). Przy wykorzystaniu narzędzia „floor inspection” wykonano mapę inspekcji i ustalono rzędną Z na podstawie projektu wykonawczego. Współrzędna Z wykorzystana do stworzenia mapy inspekcji miała wartość  $Z=18,255$  m.

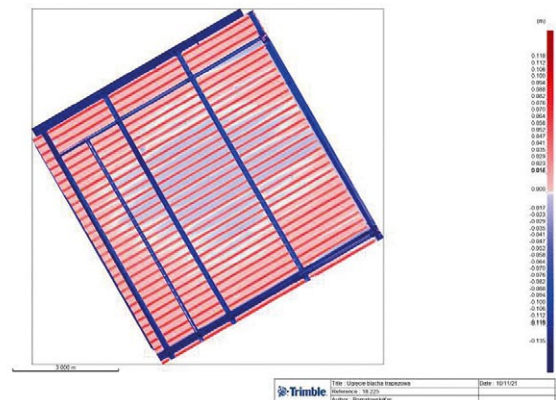


**Rys. 17.** Pomiary wysokości na ostatniej kondygnacji w TRW (opracowanie własne)



**Rys. 18.** Mapa inspekcji ugięcia konstrukcji stalowej i blachy trapezowej (opracowanie własne)

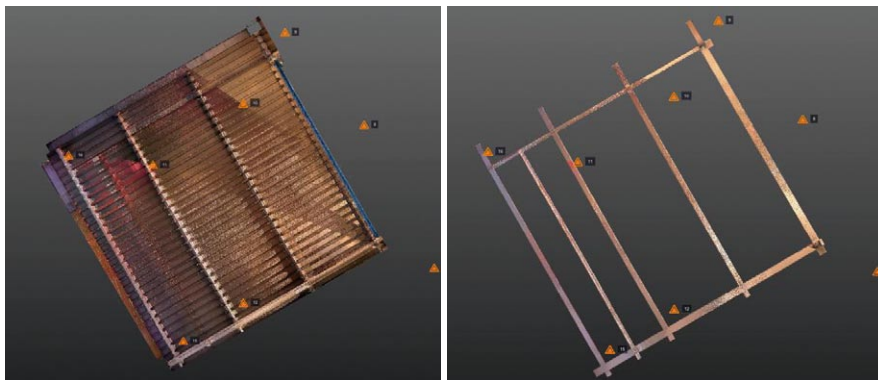
Dodatkowo stworzono mapę inspekcji wraz z niwelacją punktów, pozwalającą na odczytanie odchyłek od rzędnej projektowanej. Poza tym mapa została pokolorowana na czerwono w miejscach, w których punkty chmury znajdują się powyżej rzędnej referencyjnej i na niebiesko poniżej tej rzędnej. Na biało/szaro oznaczono punkty, które są na rzędnej referencyjnej (rys. 19).



**Rys. 19.** Mapa inspekcji blachy trapezowej i konstrukcji stalowej (opracowanie własne)



**Rys. 20.** Widok 2D chmury punktów analizowanej części dachu (a), chmura punktów – konstrukcja stalowa do analizy ugięcia belek (b) (opracowanie własne)

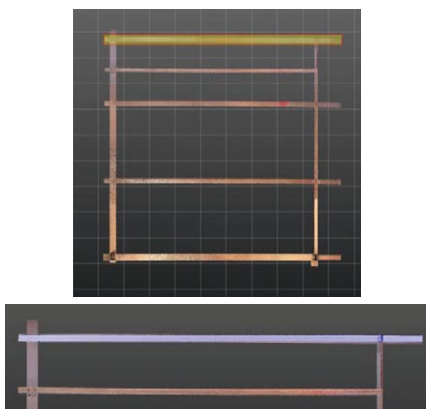


W wyniku przeprowadzonej analizy zaobserwowano dla blachy trapezowej (T55/0,7) ugięcie w środku rozpiętości wynoszące 11 mm. Następnie przystąpiono do sprawdzania belek stalowych. Już na podstawie mapy inspekcji wykonanej dla blachy trapezowej możliwe było sprawdzenie odchyłek, a co za tym idzie ugięcia belek. Postanowiono jednak podejść do każdej belki indywidualnie i sprawdzić jakie są maksymalne ugięcia. Z chmury punktów najpierw wycięto blachę trapezową oraz belki żelbetowe znajdujące się na obrębie obiektu (rys. 20).

Chmurę punktów przystosowano do pracy poprzez zmianę układu współrzędnych. Pozostawiono niezmienione współrzędne wysokościowe Z i obrócono układ względem osi XY w taki sposób, aby łatwiej wykonywało się analizy, a odczytywanie wartości ugięcia było wygodniejsze. Później wykonano sprawdzenie dla belek, które oparte są na belkach głównych. Biorąc pod uwagę duże rozpiętości (7,2 m) i założenia projektu budowlanego, spodziewano się odkształceń do maksymalnie 3 cm. Przygotowano mapę inspekcji oraz raport dla każdej belki i przystąpiono do sprawdzania różnic w odchyłkach, aby uzyskać wartość maksymalnego ugięcia. Procedurę postępowania dla sprawdzenia belek oraz rygla przedstawiono poniżej.

### Belka 1

Rzędna projektowana 18,11 cm (spód dolnej półki dwuteownika, rys. 21). Wykonano mapę inspekcji dla zaprojektowanej rzędnej. Wykonano siatkę pomiarową o bardzo małych odstępach (10 cm). Pozwoliło to na wykonanie bardzo dokładnej siatki, która objęła całą belkę i zagwarantowała dokładniejszy wynik niż przy większej siatce. Mapa inspekcji wykazała, że różnica wysokości pomiędzy punktami

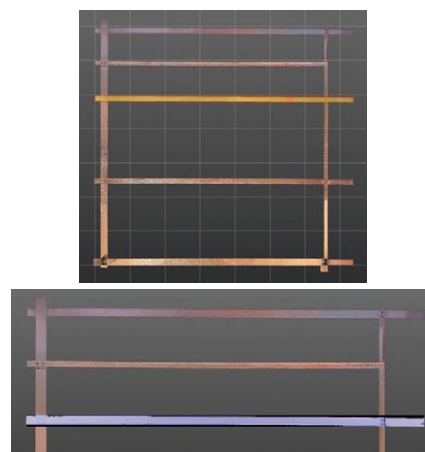


**Rys. 21.** Belka 1 oraz mapa inspekcji belki 1 (opracowanie własne)

podporowymi belki oraz największą zmierzoną odchyłką wynosi 2,7 cm, co mieści się w dopuszczalnym ugięciu. Zauważono jednak, że ta wartość nie jest dokładną wartością ugięcia, ponieważ belki, na których podpira się badana belka 1 zostały wykonane 2 cm niżej niż zakładano w projekcie. Faktyczne ugięcie belki wyniosło więc 7 mm i jest to wartość dopuszczalna ugięcia.

### Belka 2

Rzędna projektowana 18,11 cm (spód dolnej półki dwuteownika, rys. 22). Wykonano mapę inspekcji jak dla belki 1. Mapa inspekcji wykazała, że różnica wysokości punktami podporowymi belki oraz największą zmierzoną odchyłką wynosi 3,2 cm co mieści się w dopuszczalnym ugięciu. Zauważono jednak, że ta wartość nie jest dokładną wartością ugięcia, ponieważ belki, na których podpira się badana belka 2 zostały wykonane 2,3 cm niżej niż zakładano w projekcie. Faktyczne ugięcie belki wyniosło więc 9 mm i jest to wartość dopuszczalna ugięcia.

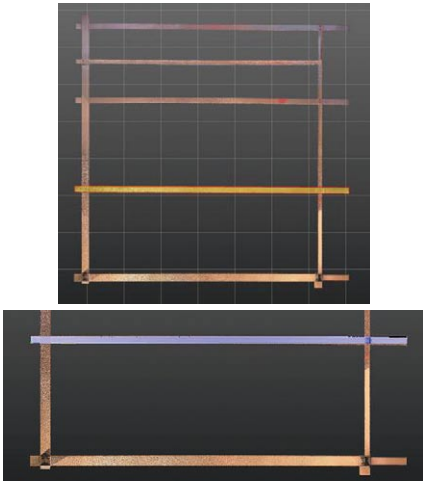


**Rys. 22.** Belka 2 oraz mapa inspekcji belki 2 (opracowanie własne)

### Belka 3

Rzędna projektowana 18,11 cm (spód dolnej półki dwuteownika, rys. 23). Mapa inspekcji wykazała, że różnica wysokości pomiędzy punktami podporowymi belki oraz największą zmierzoną odchyłką wynosi 3,3 cm, co mieści się w dopuszczalnym ugięciu. Zauważono jednak, że ta wartość nie jest dokładną wartością ugięcia, ponieważ belki, na których

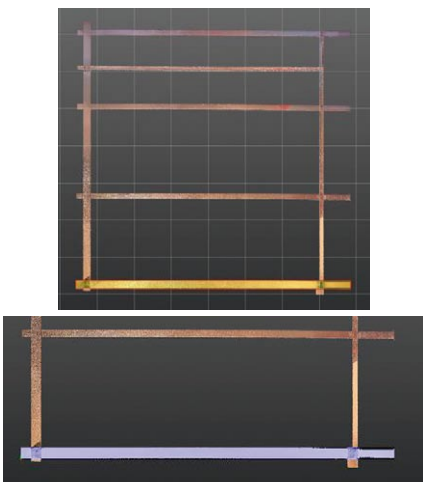
podpiera się badana belka 3 zostały wykonane 2,4 cm niżej niż zakładano w projekcie. Faktyczne ugięcie belki wyniosło więc 9 mm i jest to wartość dopuszczalna ugięcia.



Rys. 23. Belka 3 oraz mapa inspekcji belki 3 (opracowanie własne)

#### Belka 4

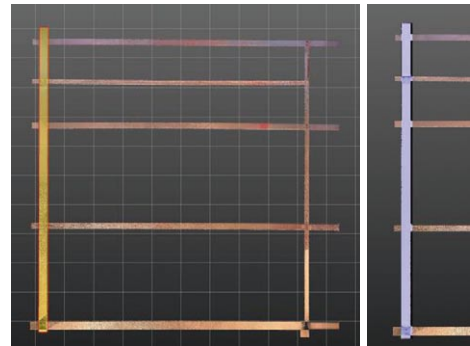
Rzędna projektowana 18,11 cm (spód dolnej półki dwuteownika, rys. 24). Mapa inspekcji wykazała, że różnica wysokości pomiędzy punktami podporowymi belki oraz największą zmierzoną odchyłką wynosi 2,8 cm, co mieści się w dopuszczalnym ugięciu. Zauważono jednak, że ta wartość nie jest dokładną wartością ugięcia, ponieważ belki, na których podpiera się badana belka 4 zostały wykonane 2,4 cm niżej niż zakładano w projekcie. Faktyczne ugięcie belki wyniosło więc 4 mm i jest to wartość dopuszczalna ugięcia. Jest to belka, która znajduje się w ciągu głównym i ma przekrój HEB 200. Pozostałe belki: 1, 2, 3 to elementy wykonane z HEB 140 i te belki ugięły się o większą wartość niż belka 4. Innym problemem, który zauważono, jest obniżenie konstrukcji stalowej. Z tego względu sprawdzono również ugięcie i rzędne ryglu wspierającego wyżej analizowane belki. Rzędna ryglu powinna wynosić 18,11 cm i licować się z belkami, które się na nim opierają.



Rys. 24. Belka 4 oraz mapa inspekcji belki 4 (opracowanie własne)

#### Rygiel wspierający belki

Rzędna projektowana 18,11 cm (spód dolnej półki dwuteownika, rys. 25). Rygiel został wykonany z dwuteownika HEB 200. Rozpiętość ryglu wynosi 7,2 m. Mapa inspekcji wykazała, że różnica wysokości pomiędzy punktami podporowymi ryglu oraz największą zmierzoną odchyłką wynosi 2,5 cm, co mieści się w dopuszczalnym ugięciu. Zauważono jednak, że ta wartość nie jest dokładną wartością ugięcia, ponieważ analizowany rygiel został wykonany 2 cm niżej niż zakładano w projekcie. Faktyczne ugięcie belki wyniosło więc 5 mm i jest to wartość dopuszczalna ugięcia. Co więcej, analiza ryglu wykazała te same wartości odchyłek w miejscach połączeń z belkami, które stwierdzono na podstawie analizy belki. Utwierdziło to analizującego w tym, że wykonane mapy inspekcji dobrze odwzorowują stan rzeczywisty i uzyskane wyniki można uznać za miarodajne.



Rys. 25. Rygiel oraz mapa inspekcji ryglu (opracowanie własne)

Podsumowując, zarówno rygiel wspierający jak i belki na nim oparte ugięły się. Elementy konstrukcyjne poddane analizie i ich wartości ugięcia zestawiono w tabeli 1. Wartości ugięć uzyskano w raportach z analiz, które przeprowadzono w Trimble RealWorks. Wartości odczytywano z tabel zawierających informacje o punktach pomiarowych oraz z map inspekcji uzyskanych w trakcie analizy.

Wykorzystując skanowanie laserowe, można więc nie tylko wykonywać pomiary ugięć stropów czy odchyłek posadzek, ale można wykorzystywać chmury punktów na wiele sposobów i do różnych zadań. Celem autorów było sprawdzenie ugięć, tworzenie map ugięć i dokładne sprawdzanie różnic wysokości dla posadzek, ale równie dobrze takie chmury punktów można wykorzystać do sprawdzania spadków, poziomów i wielu innych informacji. Powodem tego jest kompleksowość chmur punktów i ogrom informacji, których dostarczają punkty posiadające rzeczywiste współrzędne, a razem tworzące prawie idealne odwzwierciedlenie skanowanej przestrzeni i obiektów.

### 3. Projekty ERASMUS+ 3M site oraz CLOEMC VI

#### 3.1. Projekt dydaktyczny 3M site

Tematyka nowoczesnych technologii oraz wielokulturowości na terenach budów jest obecnie jednym z najistotniejszych

**Tabela 1.** Wyniki analizy ugięcia belek stalowych i rygla (opracowanie własne)

	1	2	3	4	5	6
	[1]	[2]	[3]	[2-3]	[5]	[3-5]
	Element	rzędna referencyjna [m]	odchyłka przy podporze [m]	rzędna przy podporze [m]	największa odchyłka wysokości [m]	wartość ugięcia [m]
1	rygiel	18,11	0,02	18,090	0,025	-0,005
2	belka1	18,11	0,02	18,090	0,027	-0,007
3	belka2	18,11	0,023	18,087	0,032	-0,009
4	belka3	18,11	0,024	18,086	0,033	-0,009
5	belka4	18,11	0,02	18,090	0,024	-0,004

tematów polskiego (oraz europejskiego) budownictwa. Znaczna liczba obcokrajowców jest zatrudniona na budowach ze względu na znaczącą rolę budownictwa w gospodarce narodowej. Istnieje wiele placów budowy zatrudniających migrantów. Na przykład w Polsce na budowach najczęściej zatrudniani są Ukraińcy i Białorusini, w Europie Zachodniej utrzymuje się stały trend migracji ludności. W południowo-wschodniej części Europy pracownicy migrują z Azji i Afryki. Projekt 3M site porusza bardzo ważny problem, jaki stanowią integracja uchodźców i migrantów na rynku pracy w budownictwie. W chwili obecnej nie ma jeszcze dostępnych szkoleń i podręczników odnoszących się do kwestii wielokulturowości i sposobów radzenia sobie z nią na europejskich budowach. Dlatego też koncepcja połączenia zagadnień ekonomicznych, technologicznych, środowiskowych, socjologicznych i psychologicznych zaproponowana przez metodologię 3M site jest nowa i innowacyjna.

Produktami projektu (Management of a modern, multiethnic, multicultural construction site with aspects of ecology, sociology, technology, and health – 2022-1-PL01-KA220-HED-000087368) będą metodyka nauczania i podręczniki 3M dotyczące następujących zagadnień:

- prawne, techniczne i technologiczne aspekty nowoczesnego zarządzania placem budowy [4],
- socjologiczne aspekty budowy wieloetnicznej i wielokulturowej [5],
- BHP na budowie,
- zagadnienia środowiskowe placu budowy.

Wszystkie podręczniki będą oparte na doświadczeniach z 13 krajów, napisane w 3 językach (więcej przewidzianych w przyszłości) i opracowane przez wielokulturowy zespół o różnych przekonaniach, płci i pochodzeniu etnicznym. Więcej informacji na stronie projektu (rys. 26).

**Rys. 26.** Logo i QR projektu 3M site (opracowanie własne)

### 3.2. Biblioteka Menedżerów Budowlanych – CLOEMC VI

Więcej innowacyjnych i przełomowych rozwiązań, takich jak poruszone w serii czterech artykułów [1, 2, 3] znajdują Państwo w Bibliotece Menedżerów Budowlanych, która jest efektem projektów CLOEMC prowadzonych w latach 2006–2022. Obecna, szósta faza projektu zostanie ukończona w 2025 roku, a jej tematyka obejmie następujące tematy:

- projektowanie i wykonawstwo elewacji w budownictwie,
- cyfrowe bliźniaki w budownictwie [6],

- górnictwo miejskie w budownictwie,
- środowiskowe skutki trzęsień ziemi w budownictwie,
- logistyka w budownictwie,
- zielona technologia w budownictwie,
- zarządzanie talentami i przyszłe kompetencje kierowników budowy.

Wszystkie dotychczas napisane podręczniki są nieodpłatnie dostępne na stronie internetowej projektu (rys. 27).

**Rys. 27.** Logo i QR projektu CLOEMC VI (opracowanie własne)

## 4. Podsumowanie

Istotnym wyzwaniem nowoczesnego budownictwa jest digitalizacja procesów [6] i środowiska budowlanego. Skanowanie laserowe, podobnie jak wykorzystywanie modeli 3D w budownictwie, zyskuje bardzo szybko zwolenników i w niedalekiej przyszłości ma stać się jednym z podstawowych narzędzi wykorzystywanym na budowach w Polsce.

Seria czterech artykułów przedstawia wykorzystanie skaningu laserowego na budowie szpitala. Przybliżone zostały opracowane przez autorów sposoby wykorzystania chmur punktów oraz własne metody pracy przy skanowaniu w terenie. Nowatorskie metody pracy przy skanowaniu zbrojenia elementów żelbetonowych czy porównanie uzyskiwanych w różnych programach map ugięcia zostały opracowane na potrzeby niniejszej pracy. Opisano także wykorzystanie skanera przy różnych zagadnieniach pojawiających się w trakcie realizacji, np. wykrywaniu kolizji i niezgodności z projektem na budowie, inwentaryzacji robót zanikowych.

Pierwszym opisanym zagadnieniem było znajdowanie kolizji wykonanych już na budowie instalacji z planowanymi do wykonania sufitami podwieszanymi. Dzięki wykonanym raportom udało się wykryć ponad 100 różnych kolizji i zaproponować ich rozwiązanie jeszcze przed przystąpieniem do robót związanych z zawieszaniem sufitów. Dzięki



wykorzystaniu skaningu laserowego możliwe jest skrócenie czasu trwania budowy, co często przekłada się także, na zmniejszenie kosztów budowy.

Uzyskane dane ze skanowania same w sobie stanowią gotowe narzędzie do wykrywania kolizji, ale mogą także posłużyć jako bardzo precyzyjnie wykonana inwentaryzacja. Chmura punktów może posłużyć do wykonywania obmiarów wykonywanych prac i wielu innych zastosowań. Dobrą praktyką jest więc planowanie skanowania. Dzięki odpowiednio zaplanowanej pracy uzyskiwane chmury punktów miały więcej niż jedno możliwe zastosowanie.

Kolejnym zagadnieniem opisanym przez autorów była analiza wykonywanych prac na budowie. Przeprowadzone analizy ugięcia stropu żelbetowego pokazują, że analizy w Dynamo i w Trimble RealWorks (TRW) dają podobne wyniki i mogą posłużyć do sprawdzania takich informacji, jak spadki czy ugięcie stropów żelbetowych. Zaletą użycia Dynamo do analizy jest fakt, że mapa inspekcji nie zawiera miejsc, które zostały „sztucznie” interpolowane i pokolorowane, ponieważ w Dynamo działa się tylko wykorzystując elementy jakimi są punkty z chmur punktów. Analiza w TRW jest przejrzysta i wygodniejsza do odczytania dla niewprawionego w tej dziedzinie użytkownika czy inżyniera na budowie. Podsumowując, analiza ugięć stropów jest możliwa i efektywna, tak w Dynamo, jak w TRW. Dynamo pozwala na szersze wykorzystanie chmur punktów w celu wykonywania lub analizowania chmury z modelem 3D. Powodem tego jest bezpośrednia współpraca z programem Revit, obsługującym modele cyfrowe 3D. Ponadto umożliwia samo modelowanie na podstawie chmury. TRW poza samą mapą inspekcji umożliwia dokładniejszą analizę ugięcia poprzez tworzenie przekrojów oraz przede wszystkim stworzenia mapy z naniesionymi na rzut punktami pomiarowymi i ich odchyłkami od rzędnej referencyjnej. Dodatkowo w TRW użytkownik może wygenerować listę ponumerowanych punktów z dokładną informacją o odchyłce czy współrzędnych punktów.

Sprawdzając ugięcie belek w części czwartej artykułu, potwierdzono za pomocą map inspekcji te same wartości odchyłek w miejscach połączeń z belkami, które stwierdzono na podstawie analizy belek przez uprawnionego geodetę. Utwierdziło to analizujących w tym, że wykonane mapy inspekcji dobrze odwzorowują stan rzeczywisty i uzyskane wyniki można uznać za miarodajne. Wykorzystując skanowanie laserowe, można więc nie tylko wykonywać pomiary ugięć stropów czy odchyłek posadzek, ale również wykorzystywać chmury punktów na wiele sposobów i do różnych zadań. Takie chmury punktów można wykorzystać do sprawdzania spadków, poziomów i uzyskania wielu innych informacji. Powodem tego jest kompleksowość chmur punktów i ogrom informacji, których dostarczają punkty posiadające rzeczywiste współrzędne, a razem tworzące prawie idealne odzwierciedlenie skanowanej przestrzeni i obiektów.

Analizując wykorzystanie skanera do inwentaryzacji, nie trudno znaleźć wymierne zastosowania i wykorzystania

skaningu laserowego. Dzięki chmurom punktów, możliwe jest bardzo dokładne wykonywanie obmiarów robót wraz z jednoczesnym uwiecznieniem stanu rzeczywistego w formie punktów o konkretnych współrzędnych. W ten sposób użytkownik uzyskuje ogromną ilość danych i informacji, która nie zniknie wraz z postępem prac. Skanowanie zbrojenia budowlanego nie jest spotykaną praktyką w budownictwie. W artykułach przedstawiono innowacyjne metody wykonywania pomiarów, które dają dużą dokładność pomiarową. Dodatkowo uzyskane tymi metodami chmury punktów są bardzo wydajne i możliwe do zrealizowania na placu budowy, bez znacznej ingerencji w prowadzone prace.

Wykonanie skanów zbrojenia o takiej jakości i dokładności może posłużyć do przygotowywania dokumentacji powykonawczej, modeli trójwymiarowych 3D elementów żelbetowych, które poza geometrią elementów będą także zawierać informację o liczbie i przekrojach prętów wykorzystanych do wykonania konkretnych elementów.

Skany mogą także okazać się przydatne podczas eksploatacji obiektu budowlanego, gdyby element żelbetowy zaczął pękać lub zarysowywać się w nieprzewidywalny sposób. W takiej sytuacji możliwe byłoby przeprowadzenie poszukiwań przyczyny zarysowania, w siatce zbrojeniowej. Innym wykorzystaniem takiej chmury może być sytuacja, w której należy na budowie wykonać otwór w elemencie żelbetowym, już po jego wykonaniu. Dzięki chmurom punktów, możliwe będzie sprawdzenie, jak wygląda siatka zbrojeniowa, przed wykonaniem otworu. Pozwoli to na identyfikację miejsc, w których znajdują się najgrubsze pręty lub zagęszczenia siatki zbrojeniowej wykonane z powodów konstrukcyjnych. Podsumowując, możliwości wykorzystania chmur punktów w budownictwie są ogromne i na pewno nie wszystkie zostały do tej pory odkryte i opisane. Zadaniem autorów było sprawdzenie, w jaki sposób chmury punktów mogą wspierać proces budowy. Przedstawiono autorskie schematy pracy i wykorzystania chmur punktów, które mogą zaoszczędzić czas oraz fundusze, a także mogą posłużyć do kontroli i podnoszenia jakości wykonywanych robót.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Nowak P., Rosłon J., Romatowski K., Wykorzystanie skaningu laserowego i chmur punktów na budowie. Część I, Przegląd Budowlany 5–6/2022, str. 34–44, ISSN 0033-2038
- [2] Nowak P., Rosłon J., Romatowski K., Wykorzystanie skaningu laserowego i chmur punktów na budowie. Część II, Przegląd Budowlany 7–8/2022, str. 64–73, ISSN 0033-2038
- [3] Nowak P., Rosłon J., Romatowski K., Wykorzystanie skaningu laserowego i chmur punktów na budowie. Część III, Przegląd Budowlany 1–2/2023, str. 48–54, ISSN 0033-2038, DOI: 10.56.04/01.30.01.0016.2698
- [4] Sobieraj J., Impact of spatial planning on the pre-investment phase of the development process in the residential construction field, Archives of Civil Engineering 63(2)2017
- [5] Bryx M., Sobieraj J., Metelski D., Rudzka I., Buying vs. Renting a Home in View of Young Adults in Poland, Land 10(11)2021, str. 1183
- [6] Sobieraj J., Metelski D., Nowak P., PMBoK vs. PRINCE2 in the context of Polish construction projects: Structural Equation Modelling approach, Archives of Civil Engineering 67(2)2021