

Praktyczne doświadczenia w zastosowaniu modelu BIM w projektowaniu mostu żelbetowego

Praktyczne zastosowanie metodologii BIM w polskim budownictwie infrastrukturalnym, w szczególności w mostownictwie, nie jest jeszcze powszechne. Wynika to m.in. z dużej złożoności obiektów, skomplikowanej geometrii oraz dużej współzależności wielu branż, w tym wymagań dotyczących tras drogowych lub kolejowych, w których ciągu (nad którymi) są usytuowane obiekty mostowe.

Korzyści z wdrożenia metodologii BIM oraz zapowiadzi pojawienia się aktów prawnych, obligujących jej zastosowania w inwestycjach publicznych [7, 9, 10] oraz nieliczne jeszcze publiczne przetargi z wymaganiami dotyczącymi BIM-u [11] sprawiają, że zainteresowanie BIM-em również wśród uczestników procesów inwestycyjnych w budownictwie infrastrukturalnym jest coraz większe. Nie bez znaczenia są także doświadczenia kadry zarządzającej, która pracowała przy tego rodzaju inwestycjach za granicą, a obecnie pracuje w Polsce.

W artykule opisano praktyczne doświadczenia zastosowania metodologii BIM w mostownictwie, na przykładzie projektowania drogowego mostu żelbetowego o dość skomplikowanej geometrii. Szczególną uwagę zwrócono na przygotowanie rysunkowej dokumentacji projektowej. W podsumowaniu zamieszczono subiektywną ocenę przydatności zastosowanego oprogramowania w projektowaniu mostów, w szczególności mostów żelbetowych.

Zalety i wady metodologii BIM

Wdrażanie metodologii BIM wiąże się z oczekiwaniem: uzyskania narzędzi umożliwiających opracowywanie lepszej jakości dokumentacji projektowej i jej sprawniejszej weryfikacji odpowiadającej celom inwestora; wspomaganie wyceny robót i procesu ofertowania przez wykonawców; bieżącego zarządzania zmianami w trakcie budowy; wspomaganie procesu rozliczeń w kontraktach obmiarowych; kontroli postępu prac budowlanych oraz wspomaganie zarządzania obiektem budowlanym czy zmniejszenia całkowitych kosztów inwestycji [3, 19].

Występują również niedogodności związane z wdrażaniem BIM-u. Przykładem są opinie architekta *Denisa Fukai* [5], który wymienił negatywne aspekty wdrażania BIM-u, w szczególności dotyczące:

– **prostoty i łatwości stosowania**; w przypadku niestandardowych kształtów i obiektów, które występują w większości konstrukcji, są trudne bądź niemożliwe do zamodelowania, wobec tego należy je maskować lub upraszczać; parametry sprzętu wymaganego do optymalnej pracy są dużo wyższe niż typowego komputera stacjonarnego; stosowane oprogramowanie wymaga „wsparcia” dodatkowymi katalogami produktów i bibliotekami komponentów, co jest związane z dodatkowymi kosztami; BIM

nie umożliwia również prognozowania przepływów pieniężnych, dostępności materiałów czy sytuacji na rynku podwykonawców, dlatego wspólna koordynacja projektów branżowych nie jest łatwa w realizacji;

– **pełnej automatyzacji BIM-u**; proces inwestycyjny wymaga interdyscyplinarnej wiedzy, koordynacji wielu osób oraz uwzględnienia wielu kryteriów; operowania wielowarstwowym modelem trójwymiarowym, wielokrotnego koordynowania zmian tuż przed wymaganym terminem; opracowywanie modelu wymaga odpowiednich kwalifikacji oraz umiejętności obsługi oprogramowania; przydatna a czasami wręcz niezbędna jest umiejętność pisania makr oraz znajomość programowania i różnych technik umożliwiających wyeliminowanie ograniczeń oprogramowania; drukowanie rysunków, zestawień i raportów po każdej zmianie wymaga ręcznych czynności użytkowników oraz odpowiednich procedur zarządzania dokumentami;

– **użyteczności BIM-u, w szczególności na placu budowy**; istnieją wątpliwości i obawy, czy kadra inżynierska wykonawców znajdzie czas i odpowiednie środki finansowe na wielokrotne aktualizacje oprogramowania i sprzętu; najnowsze wersje oprogramowania nie dają pewności, że opracowany i zmodyfikowany model będzie użyteczny, gdyż nie wszystkie wersje programów są kompatybilne wstecznie; oferowane i stosowane dodatkowe konwertery modeli, które często nie funkcjonują bezbłędnie, przysparzają dodatkowej pracy i wydłużają czas pracy; oprogramowanie BIM ewoluuje, często powstają nowe wersje i „wymuszają” dodatkowe koszty na ich zakup, a nie zawsze umożliwiają bezproblemowe przesyłanie plików danych pomiędzy różnymi aplikacjami.

Charakterystyka zastosowanego oprogramowania

Program Tekla Structures (w skrócie *TS*) firmy Trimble [20] jest popularny w Anglii i Skandynawii, gdzie stosuje się go głównie do projektowania konstrukcji stalowych. W Polsce coraz liczniejsza grupa projektów jest również opracowywana za pomocą *TS*, w tym obiektów infrastrukturalnych, czasami żelbetowych obiektów mostowych [15]. *TS* według zapewnień producentów jest oprogramowaniem zgodnym ze standardem IFC (ang. Industry Foundation Classes) [2]. *TS* umożliwia m.in. opracowywanie modeli BIM wraz z modelowaniem spoin czy generowania połączeń śrubowych elementów stalowych, ale również opracowywanie modeli zbrojenia elementów betonowych i systemów sprężania. Po opracowaniu modelu BIM oprogramowanie umożliwia automatyczne generowanie dokumentacji projektowej – rysunków 2D niezbędnych raportów i zestawień. Do dyspozycji użytkowników są także obszerne biblioteki gotowych komponentów i ich autorskie rozwiązania z archiwalnych projek-

tów (modeli). *TS* umożliwia opracowywanie modeli z uwzględnieniem czasu, współpracuje z urządzeniami geodezyjnymi, a także obrabiarkami CNC (ang. Computer Numerical Control). Dotychczas program był użytkowany głównie przez projektantów kubaturowych konstrukcji stalowych. Na jego zakup i wdrożenie coraz częściej decydują się również zagraniczne i polskie firmy z sektora budownictwa infrastrukturalnego.

TS umożliwia również opracowanie modelu analitycznego na podstawie modelu BIM, ale jego wyeksportowanie do zewnętrznego pliku, w standardzie IFC, wymaga instalacji odpowiedniego rozszerzenia/dodatku, niedostępnego dla użytkowników edukacyjnych wersji oprogramowania. *TS* umożliwia także modelowanie struktur złożonych ze stali, drewna i betonu. Jest stosowane w przemyśle budowlanym do projektowania konstrukcji z elementów prefabrykowanych i z betonu *in situ*. Umożliwia opracowywanie i zarządzanie modelami BIM od fazy koncepcyjnej do montażu/betonowania oraz opracowywanie modeli o bardzo dużych rozmiarach, nad którymi może pracować jednocześnie wielu użytkowników (ang. multiuser mode). *TS* jest postrzegany jako oprogramowanie trudne do nauki, z powodu swojej złożoności, i drogie, szczególnie w warunkach polskich [4]. W przypadku konstrukcji żelbetonowych *TS* oferuje funkcje przeznaczone do zbrojenia elementów (nawet o złożonej geometrii) oraz gotowe komponenty redukujące projektowanie zbrojenia typowych elementów poprzez wybór odpowiedniego rodzaju zbrojenia oraz wskazania rozpatrywane go obiektu betonowego.

Specyfika modelu BIM

Model 3D jest centralną częścią modelu BIM. Jest to trójwymiarowy model geometryczny, do którego są dodawane – równolegle bądź stopniowo uzupełniane – kolejne warstwy informacji użytecznych w całym cyklu życia budowli (jest także oznaczany jako **3D+**) [3, 16]. Podstawowymi elementami składowymi modelu są specjalistyczne, kompleksowe obiekty o przeznaczeniu inżynierskim (wymienione w dokumentacji standardu IFC 2×3 [1]), pełniące funkcje konstrukcyjne (ściany, belki, ławy, stopy fundamentowe czy pręty zbrojeniowe) lub niekonstrukcyjne (instalacje, balustrady, izolacje). Każdy z obiektów jest opisany nie tylko współrzędnymi wierzchołków czy punktów charakterystycznych, ale również zawiera informacje o własnych cechach, m.in.: o ilości i rodzaju materiału z jakiego jest zbudowany, właściwościach termicznych, mechanicznych czy też etapowaniu robót.

Modelowanie geometrii obiektów mostowych [6, 8] wynika w dużej mierze z niwelety – przebiegu ciągu komunikacyjnego w przestrzeni (odcinki proste, łuki i krzywe przejściowe) oraz spadków poprzecznych, często zmieniających na jego długości. Modelowanie obiektu mostowego za pomocą programu z grupy BIM, jak na przykład *TS*, wymaga niejednokrotnie zrezygnowania z dedykowanych funkcji na rzecz rozwiązań prowizorycznych lub użycia narzędzi ogólnego przeznaczenia.

Na przykład model podpory pośredniej, złożonej z dwóch filarów usytuowanych na oczepie palowym, można wykonać za pośrednictwem systemowych narzędzi/obiektów żelbetonowego słupa konstrukcyjnego oraz płyty stropowej. Definicja przekroju, o ile znajduje się on w katalogu dostępnych kształtów, sprowadza się do wyboru z listy albo manualnego wpisania aliasu we właściwe pole profilu wraz z odpowiednimi wymiarami i wartościami parametrów. Jeżeli biblioteki nie zawierają wymaganego kształtu, to należy

przejsć do tworzenia przekroju w edytorze Cross Section Sketch Editor lub przystąpić do edycji obecnych profili.

Każdy obiekt modelu BIM ma przypisany swój identyfikator ID, który jest unikatowy w danym modelu, oraz identyfikator GUID (ang. Globally Unique Identifier), który jest niepowtarzalny na całym świecie. Raz utworzony element może być modyfikowany w dowolnej chwili. W opisywanym programie oraz innych zastosowaniach BIM zmiana wymiarów przekroju, długości lub innych gabarytów skutkuje automatyczną aktualizacją szeregu właściwości, w tym objętości potrzebnego materiału, pola przekroju itd. Dzięki temu zawsze aktualne dane można wyeksportować na potrzeby systemów zewnętrznych zgodnych ze standardem BIM.

Jednocześnie z modelem geometrycznym (3D) istnieje możliwość stworzenia modelu analitycznego. Należy jednakże nadać obiektom dodatkowe atrybuty dotyczące mechaniki (pracy) konstrukcji, np. warunków brzegowych. Moduł przeznaczony do przygotowania modelu analitycznego umożliwia deklarowanie obciążeń (punktowych, liniowych lub powierzchniowych), a następnie eksport do środowiska MES, gdzie jest podstawą do wykonania analiz numerycznych.

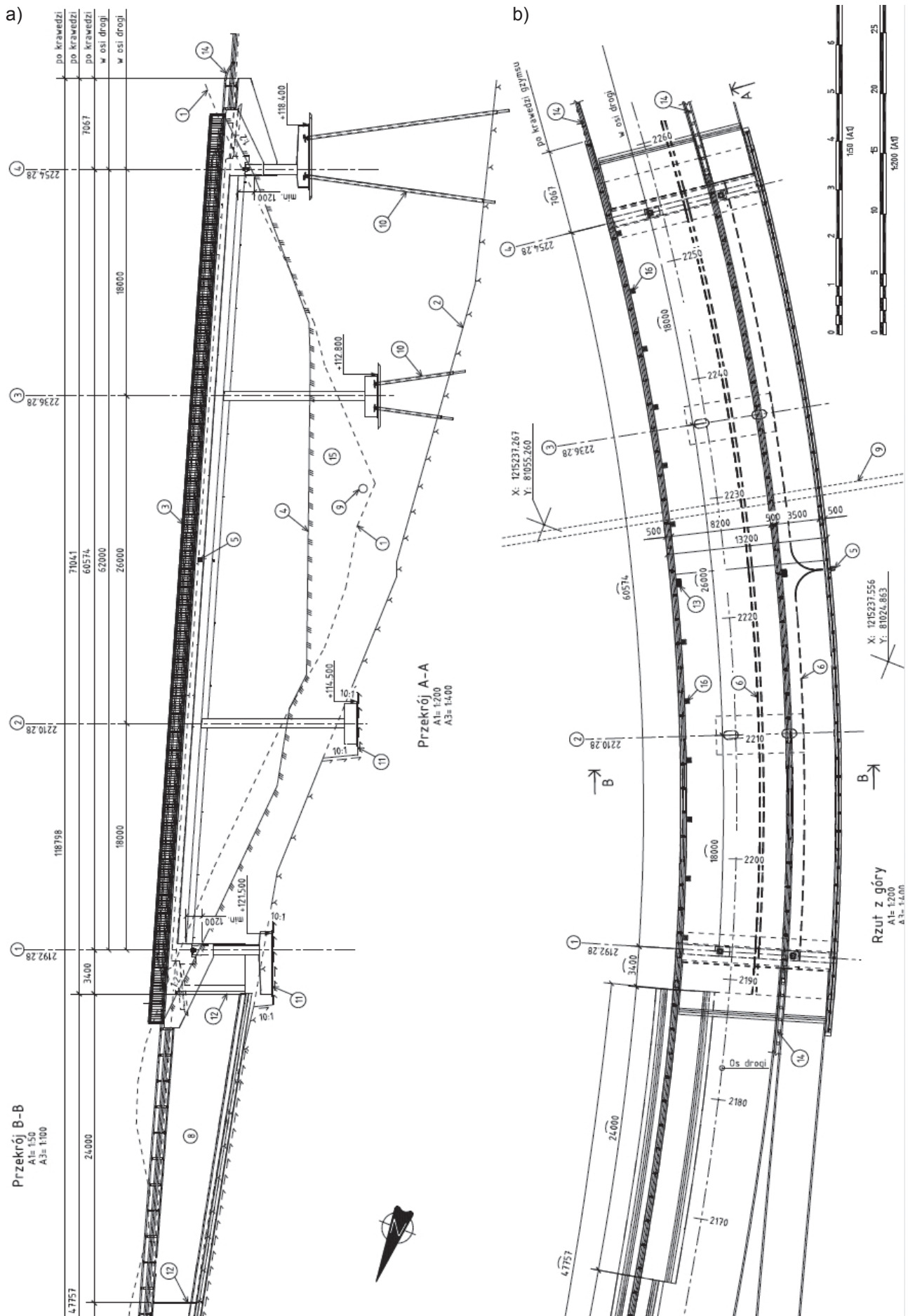
Charakterystyka mostu i przeszkody

Most oznaczony symbolem K3 został pierwotnie zaprojektowany na zlecenie Norweskiego Krajowego Zarządu Dróg i Autostrad (Statens vegvesen), a jego konstrukcja została dostosowana do norweskich zaleceń i wytycznych. Obiekt ma przeprowadzać drogę Fv. 279 nad doliną i ciekim wodnym w miejscowości Fetsund, znajdującej się około 30 km na wschód od Oslo. Konstrukcja nośna została również, na potrzeby pracy [15], zaprojektowana według norm PN-EN z uwzględnieniem polskich wymagań dotyczących oddziaływań termicznych i klimatycznych. W tym celu przyjęto zastępczą lokalizację obiektu w Warszawie. Obciążenia przyjęto według PN-EN 1991-2 [12] z odpowiednimi współczynnikami dostosowawczymi według pracy [17] tak, aby odpowiadały klasie obciążenia A według PN-S-10030:1985 [14].

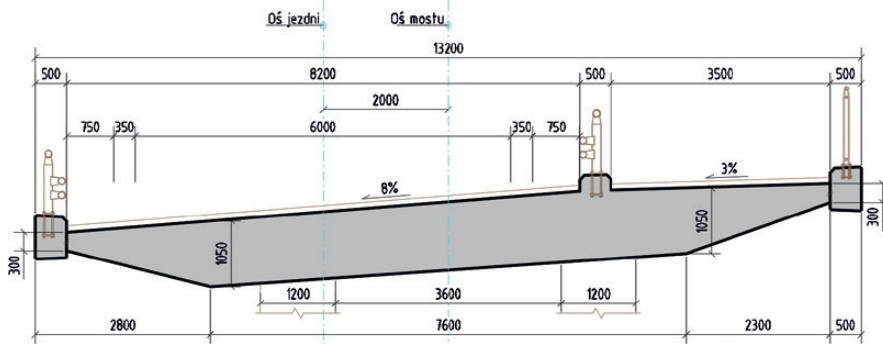
Model mostu

Model geometryczny mostu i ściany oporowej (rys. 1+4) dostosowano do przebiegu drogi oraz cyfrowego modelu terenu stworzonego na podstawie wykonanego wcześniej skaningu laserowego. Przebieg drogi został zamodelowany przez projektantów drogowych w pliku 3D, zawierającym jej wszystkie elementy, m.in. warstwy nawierzchni i podbudowy. Plik ten stał się punktem odniesienia dla projektowanego mostu.

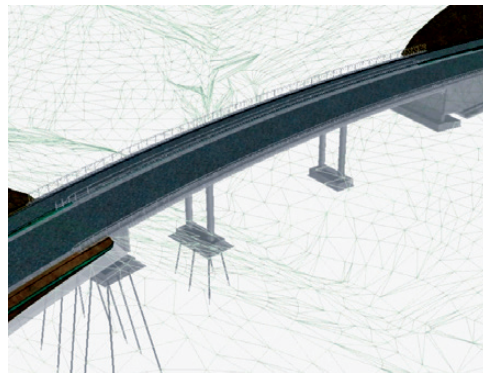
Geometria obiektu jest dość skomplikowana, ponieważ droga na obiekcie przebiega w łuku poziomym o promieniu 199,84 m, z 7-procentowym spadkiem niwelety oraz poprzecznymi spadkami górnej powierzchni płyty (rys. 1, 2, 5, 6). Do zamodelowania pomostu zastosowano dodatek Beam Extruder, który na podstawie pliku arkusza kalkulacyjnego, zawierającego współrzędne punktów na niwelecie, dyskretyzuje kształt pomostu, modelując go belkami (siecznymi) o zadanej długości. Długość odcinków wynosząca około 0,5 m gwarantuje odchylenia znacznie poniżej dopuszczalnych tolerancji wykonawczych w konstrukcjach betonowych. Analogicznie postępowano podczas kształtowania dwóch belek gzymsowych, elementu separującego ruch samochodu od ciągu pieszo-rowerowego i zawieszonych skrzydeł oraz ściany oporowej, gdyż wszystkie wymienione fragmenty konstrukcji odzwierciedlają krzywoliniowy kształt trasy.



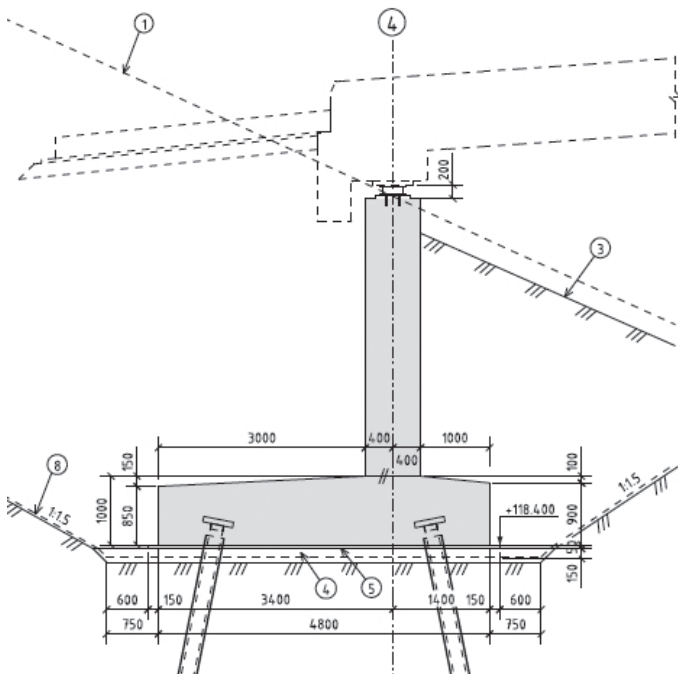
Rys. 1. Rysunki ogólne (geometryczne TS): a) przekrój podłużny (fragment), b) widok z góry (fragment)



Rys. 2. Przekrój poprzeczny pomostu (Autocad)



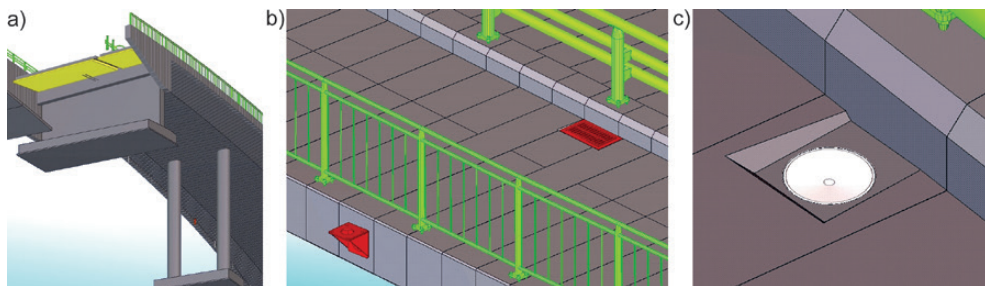
Rys. 4. Przykład wizualizacji obiektu (Autodesk Navpoint) wraz z modelem drogowym, projektowanym przebiegiem skarp oraz modelem istniejącego terenu



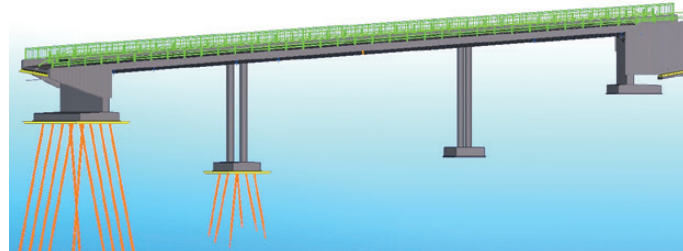
Rys. 3. Rysunek ogólny (geometryczny TS) – przekrój przyczółka

Przekrój poprzeczny pomostu opisano za pomocą funkcji Sketch Editor, dokładnie odwzorowując pożądany kształt. Dzięki parametrycznemu opisowi przekrój mógł być łatwo zmieniany podczas wstępnego procesu projektowania, np. w odniesieniu do zmiany spadków poprzecznych niezależnie w części przeznaczonej dla ruchu samochodowego oraz w części pomostu wyodrębnionej dla pieszych i rowerzystów.

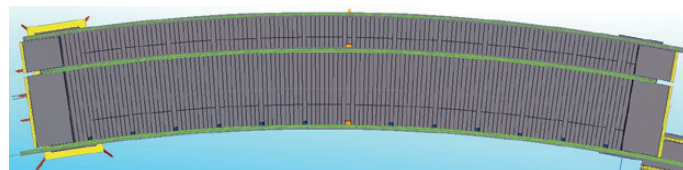
Podpory pośrednie oraz przyczółki charakteryzują się dość prostą konstrukcją, dlatego użyto podstawowych obiektów (narzędzi programu), typu: słup, belka, stopa fundamentowa. Wymagane kształty uzyskano w wyniku zastosowania cięć płaszczyznami oraz podstawowymi działaniami na bryłach – wycinanie fragmentu jednego obiektu bryłą drugiego z nich.



Rys. 7. Przykłady szczegółów modelu 3D (TS): a) podpór (od dołu), b) elementów wyposażenia, c) ukształtowanie płyty pomostu w sąsiedztwie sączków



Rys. 5. Widok z boku modelu 3D (TS)



Rys. 6. Rzut z góry modelu 3D z podziałem pomostu na elementy belkowe (TS)

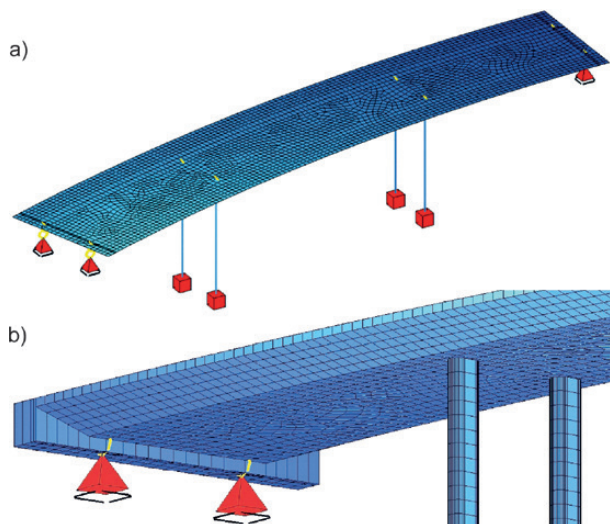
System odwodnienia pomostu, odwzorowany w modelu BIM, składa się z wpustów mostowych oraz sączków. Składowe systemu odwodnienia są elementami powtarzalnymi, dlatego zostały opracowane w formie komponentów użytkownika. Rozstaw sączków na obiekcie ułatwiała funkcja szyku biegunowego, która rozmieszcza dowolne obiekty po przyjętym promieniu z określonym przyrostem kąta. Ze względu na pochylenie podłużne niwelety niezbędna okazała się manualna korekta współrzędnych wysokościowych każdego z sączków.

Pochylenie podłużne i poprzeczne górnej powierzchni żelbetowej płyty spowodowało konieczność ukształtowania odpowiednich spadków i załamień w sąsiedztwie elementów odprowadzających wodę z obiektu. Dzięki odpowiednim funkcjom TS związanym z docinaniem obiektów zrealizowano wszystkie wnęki oraz pochylenia umożliwiające dopływ wód do elementów odwodnienia (rys. 7).

Wyposażenie obiektu stanowią także stalowe części składowe systemu bezpieczeństwa ruchu drogowego, elementy uziemienia oraz kotwy pod latarnię, która została wykonana

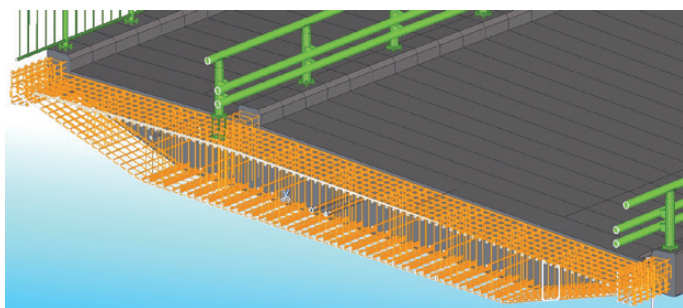
jako komponent programu TS ze stalowych płyt. Pozostałe obiekty, takie jak słupki barier, zaimportowano do modelu BIM w formacie DWG 3D (pobrane z internetowych bibliotek producentów) i odpowiednio wkomponowano do modelu.

Model analityczny (analizy statyczne) wykonano, stosując program SOFiSTiK [18], za którego pomocą sporządzono obliczeniowy model MES (rys. 8). Na podstawie wyznaczonych wartości obwiedni sił wewnętrznych zwymerowano zbrojenie pomostu, stosując moduły obliczeniowe wspomnianego programu. W celu weryfikacji sprawdzono „ręcznie” wymagane ilości zbrojenia, w kilku wybranych przekrojach, zgodnie z wymaganiami PN-EN. Otrzymane wartości były porównywalne.

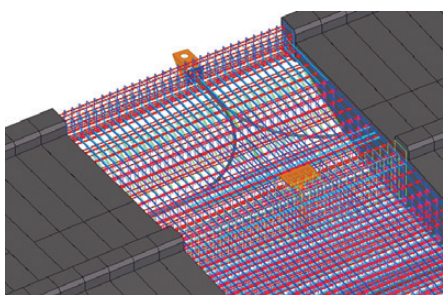


Rys. 8. Wizualizacja (SOFiSTiK): a) modelu analitycznego, b) szczegółu podparcia modelu analitycznego

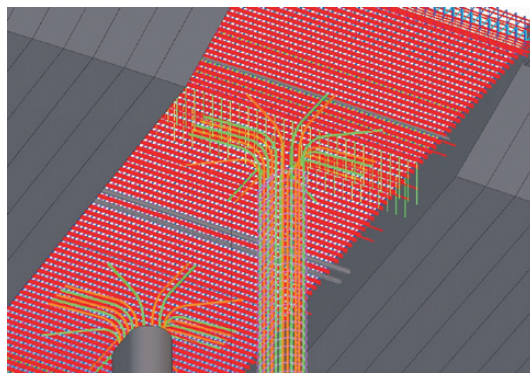
Model zbrojenia zawiera pełne zbrojenie każdego elementu żelbetowego, a istotne elementy konstrukcji zostały zweryfikowane z uwzględnieniem polskich wymagań i warunków użytkowania oraz zamodelowane (rys. 9÷13) [15].



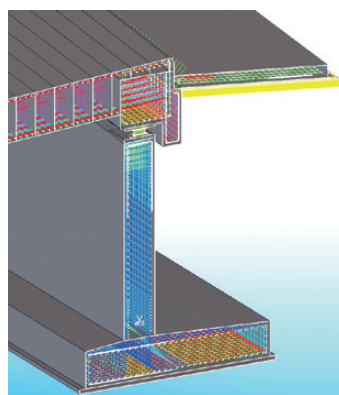
Rys. 9. Widok modelu 3D – przekrój pomostu z odsłoniętym zbrojeniem (TS)



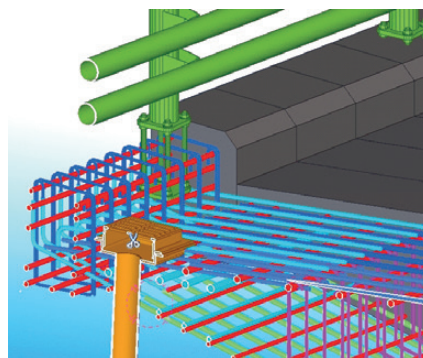
Rys. 10. Widok modelu 3D – zbrojenie pomostu od góry z wpustami, kanałami instalacyjnymi oraz kotwą do montażu latarni pomostu (TS – kolory prętów według przypisanych klas)



Rys. 11. Widok modelu 3D – zbrojenie pomostu wraz ze zbrojeniem słupa oraz kanałami kablowymi zatopionymi w pomoście (TS – ukryta dolna warstwa zbrojenia pomostu, kolory prętów według przypisanej klasy)



Rys. 12. Widok modelu 3D – przekrój przez poprzecznice, przyciótek oraz płytę przejściową



Rys. 13. Widok modelu 3D – przykład układu zbrojenia w sąsiedztwie wpustu (TS)

Wszystkie pręty o jednakowym kształcie mają przypisany numer szeregowy poprzedzony prefiksem. Numer jest niepowtarzalny, zatem jednoznacznie określa dany element zbrojenia w modelu, na rysunkach oraz zestawieniach stali i raportach. Do obiektu K3 przydzielono prefiks w postaci litery „C”, natomiast wyodrębnione elementy konstrukcji, takie jak: pomost, poprzecznice, belki gzymsose, podpory itd., mają przydzielone zakresy dostępnych numerów szeregowych, które dokładnie przedstawiono w tabl. 1. Takie rozwiązanie wymaga zadeklarowania liczby wszystkich rodzajów prętów występujących w danym elemencie, z ewentualnym uwzględnieniem większego zakresu na nieprzewidziane zmiany, tak aby numery się nie powtarzały. Jego zaletą jest natomiast ułatwienie identyfikacji prętów i określanie ich docelowego miejsca wbudowania. Pręty dłuższe niż długość fabrykacyjna (12 m), których zakłady należy rozmieścić na placu budowy, z racji swojej specyfiki, odróżniono od reszty prętów oznaczeniem „LM” na rysunkach, a dodatkowo przypisano im pięciocyfrowe numery, w których dwie ostatnie cyfry ozna-

Tablica 1

Zakresy numerów szeregowych przypisanych prętom zbrojeniowym w obiekcie K3 oraz towarzyszącym murze oporowym

Obiekt	Nr osi	Element	Prefiks	Początek zakresu	Koniec zakresu
Przyczółek	1	ława	C	1100	1199
	1	ściana	C	2100	2199
	4	ława	C	1400	1499
	4	ściana	C	2400	2499
Ława fundamentowa	2	fundament w osi 2	C	1200	1299
	3	fundament w osi 3	C	1300	1399
Słupy	2	słupy w osi 2	C	3200	3299
	3	słupy w osi 3	C	3300	3399
Pomost	1-4	plyta	C	4000	4099
	1	poprzecznicza	C	4100	4149
	1	skrzydła	C	4150	4199
	4	poprzecznicza	C	4400	4449
	4	skrzydła	C	4450	4499
Płyty przejściowe	1	plyta przejściowa w osi 1	C	5100	5199
	4	plyta przejściowa w osi 4	C	5400	5499
Belki gzymsowe	1-4	belki gzymsowe	C	6000	6999
Mur oporowy	1	ława fundamentowa	C	7100	7149
	1	ściana	C	7150	7199

czają średnicę pręta. Program, obliczając łączną długość i masę całkowitą grupy takich prętów, odpowiednio zwiększa te wartości ze względu na długości zakładów, opierając się na średniej długości tych prętów.

Pręty w modelu są klasyfikowane według kształtu i wymiarów poszczególnych odcinków. Algorytm rozpoznaje typ pręta według określonych reguł, a następnie przypisuje mu kody kształtu gięcia zgodnie z wytycznymi użytkownika lub np. według PN-EN ISO 3766:2006 [13], jak to miało miejsce w omawianym modelu. Domyślnie istniejące reguły wymagały jednak nieznacznych modyfikacji, ponieważ podłużne pręty w płycie pomostu były oznaczane kodem gięcia nr 67, tj. pręty wyginane w kształt łuku. Przy wielkości promienia gięcia około 200 m, strzałka ugięcia pręta długości 12 m wynosi około 9 cm, zatem mimo dużych średnic zbrojenia można uznać taki pręt za prosty, a pożądana krzywizna zostanie ukształtowana ręcznie na placu budowy. Zmianą, jaką wprowadzono, było dodanie warunku dotyczącego kodu gięcia nr 0 (pręt prosty), który automatycznie uznawał pręty o promieniu większym niż 190 m za pręty proste.

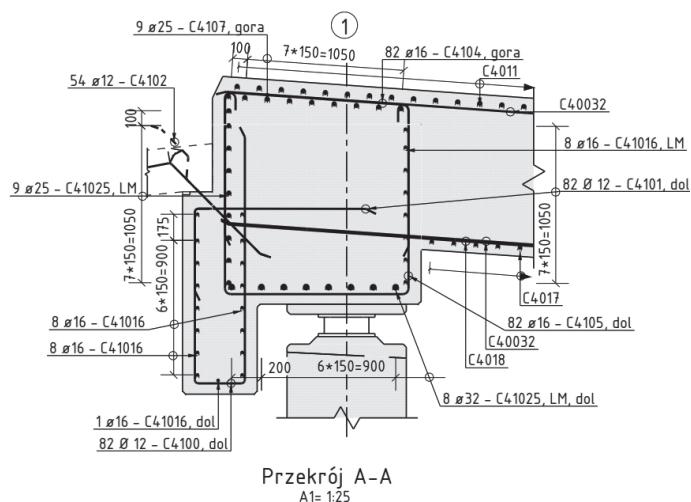
Duża ilość zbrojenia występująca w tym projekcie utrudniała operowanie modelem 3D. Sposób wyświetlania prętów w jednym kolorze nie jest optymalny podczas codziennej pracy z programem. W celu poprawienia czytelności widoków podczas modelowania zbrojenia stosowano przede wszystkim filtrowanie prętów oraz różnicowanie kolorów prętów według dowolnie wybranej właściwości. Do zawężenia wyboru lub rozróżnienia prętów mogą

posłużyć różnorakie kryteria, takie jak klasa, średnica, długość, atrybuty użytkownika oraz wszelkie inne parametry, które nadano prętom w modelu BIM.

W przypadku omawianego obiektu, z powodu skomplikowanej geometrii pomostu, zbrojenie jest dość złożone i wymagało niestandardowych narzędzi do modelowania prętów. Po pierwsze, krzywizna pomostu wymaga różnych promieni gięcia łukowych prętów podłużnych leżących w tych samych warstwach. Domyślnie TS nie dysponuje odpowiednimi narzędziami do modelowania grupy podłużnych prętów modelu pomostu, utworzonego w sposób opisany wyżej, gdzie każdy pręt ma promień zwiększony o dany przyrost. Dysponując tylko podstawowymi funkcjami, projektant modelujący zbrojenie musiałby definiować każdy pręt oddzielnie, co skutkowało by późniejszymi utrudnieniami podczas generowania rysunków zbrojeniowych oraz znacznie wydłużyłoby wprowadzanie następnych modyfikacji. Przydatny podczas modelowania podłużnych prętów warstwy górnej i dolnej okazał się komponent o nazwie CIP_MainBars. Jego działanie polegało na wygenerowaniu prętów podłużnych w elementach uprzednio utworzonych za pomocą dodatku BeamExtruder na podstawie grupy prętów zdefiniowanej w pojedynczej belce. Mimo że na poziomie obiektu dalej są to pojedyncze pręty, a nie grupa prętów, to zgrupowane są w obrębie jednego komponentu. Dzięki temu pręty mają jednakowe wspólne właściwości, które dają się łatwo i szybko zmieniać.

Kolejnym utrudnieniem była konieczność różnicowania rozstawów zbrojenia poprzecznego. Każda grupa wewnętrznych strzemion musi mieć inny rozstaw prętów, aby zlokalizować je w tym samym miejscu względem promiennicie rozłożonych prętów poprzecznych górnej oraz dolnej warstwy. Jednakowe rozstawy skutkowałyby powstawaniem licznych kolizji między prętami, czego należało uniknąć.

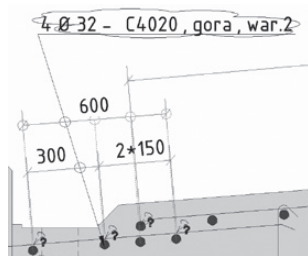
Słupy, przyczółki oraz podwieszane skrzydła charakteryzują się prostą formą, dlatego opracowywanie zbrojenia w tych elementach nie przysporzyło problemów (por. rys. 11, 12). Komponenty generujące zbrojenie słupów bardzo przyspieszyły pracę, a duża liczba dostępnych do wyboru parametrów umożliwiła dostosowanie prętów do geometrii i założeń projektowych. Zbrojenie poprzecznic składa się z grup prętów prostych oraz różnego rodzaju strzemion (rys. 12, 14). Zmienna wysokość strzemion głównych,



Rys. 14. Przykład dokumentacji rysunkowej (fragment) opracowanej na podstawie modelu 3D – przekrój poprzeczny poprzecznic skrajnej z układem zbrojenia (TS)

matycznie, natomiast na dole znajduje się linia utworzona ręcznie, ale powiązana z położeniami istotnych prętów w grupie. Wariant automatyczny niedostatecznie odwzorował projektowane rozstawy, dlatego zdecydowano się na manualne tworzenie wyżej wymienionych linii wymiarowych każdej grupy prętów zbrojeniowych.

Rys. 16. Porównanie linii wymiarowych określających rozmieszczenie prętów w obrębie jednej grupy: na górze linia wygenerowana automatycznie, na dole linia utworzona ręcznie



Użyteczną funkcją programu *TS* okazało się wskazywanie zmian w obiektach rysunkowych (etykiety, linie wymiarowe, opisy itd.), jakie zaistniały od ostatniego zamknięcia rysunku. Program tzw. chmurami rewizji (widocznymi w górnej części rys. 15) samoczynnie oznacza miejsca, w których automatycznie dokonał zmian, np. wydłużenie linii wymiarowej spowodowane zmianą wysokości słupa lub dostosowanie wartości parametrów na etykiecie grupy prętów spowodowane zmianą średnic zbrojenia w modelu BIM. Niektóre dowiązania (oznaczeń, wymiarów) do obiektów 3D zostały zerwane, np. przy zmianie parametrów widoku rysunku. Wymagało to zwrócenia większej uwagi na te fragmenty rysunku, które uległy modyfikacji i potencjalnie mogły zawierać błędy.

W tradycyjnej dokumentacji zbrojeniowej (2D) umieszczano wiele rysunków zwymiarowanych i opisanych prętów zbrojeniowych każdego typu, jaki występuje na konkretnym arkuszu. Miało to za zadanie jednoznacznie określić pręty, aby było możliwe ich wytworzenie na placu budowy lub w wytwórni. Przechodząc na proces inwestycyjny realizowany w standardzie BIM, projektanci, inżynierowie budowy oraz pracownicy będą musieli nauczyć się korzystać z klasyfikacji, gdyż na nich opiera się nowa technologia. Dotyczy to też prętów zbrojeniowych, które po detekcji kształtu mają przypisany kod gięcia, zamiast dotychczasowych szczegółowych rysunków. W omawianym projekcie kody, wraz ze wszystkimi wymiarami oraz uniwersalnymi schematami form gięcia zbrojenia, zostały przeniesione do zestawienia stali zbrojeniowej, co jest powszechną praktyką. Konceptcja ta cechuje się dużą wydajnością, a dodatkowo produkcja prętów może być rozpoczęta na podstawie samego zestawienia stali zbrojeniowej wygenerowanego przez program zaraz po ukończeniu definiowania prętów w modelu BIM. Chociaż *TS* umożliwia automatyczne tworzenie schematycznych widoków prętów (w raportach lub na arkuszach rysunków), to ich forma oraz czytelność nie są na zadowalającym poziomie. Przykładem jest rysunek przedstawiony w pierwszym wierszu tabl. 2.

Cechowanie prętów, tj. tworzenie opisów lub odnośników charakteryzujących dany pręt bądź grupę prętów, może się odbywać w pełni automatycznie. Tworząc szablony

użytkownik sam decyduje, jakie informacje i parametry z bazy modelu zostaną wyświetlone na etykiecie oraz jaki będzie miała ostateczny wygląd. Wybór dostępnych typów danych jest wystarczający, aby dokładnie scharakteryzować elementy zbrojenia. Do przykładowych parametrów można zaliczyć: liczbę prętów, średnicę, rozstaw średni, rozstaw dokładny, rozstaw maksymalny/minimalny, długość, wagę, szeregowy numer identyfikacyjny, kod kształtu gięcia, wprowadzone atrybuty użytkownika itd. Wszystkie wymienione parametry aktualizują się automatycznie wraz ze zmianami w przestrzennym modelu BIM.

Raporty. Generowanie raportów i zestawień za pomocą *TS* jest bardzo sprawne i daje wiele możliwości co do formy i zawartości. Duża liczba różnych danych, przechowywanych w bazie modelu BIM, w połączeniu z funkcjami matematycznymi oraz podstawami programowania,

Tablica 2
Fragment przykładowego raportu Tekla Structures zawierającego generowane automatycznie schematyczne rysunki prętów

Nr	Ilość	Stal	Zbrojenie				Kształt	
			Średnica	Długość	Masa	Masa całk.		
C6001	822	B500NC	12	1365	1.21	498.26	19	
C40012	4	B500NC	12	65045	57.76	57.76	00	

np. instrukcjami warunkowymi, umożliwia kreowanie własnych szablonów, na których podstawie program generuje raporty zawierające informacje bezpośrednio zaczerpnięte z modelu BIM. *TS* umożliwia adaptację raportów do wymagań uczestników procesu inwestycyjnego, np. menedżerów lub kosztorysantów.

Na potrzeby zestawienia stali zbrojeniowej pomostu wykonano własny szablon raportu, według którego program tworzy plik w formacie „csv”. Plik ten jest kompatybilny z arkuszem kalkulacyjnym, do którego został zaimportowany. Wszystkie informacje znajdujące się w zestawieniach (rys. 17), z wyjątkiem poglądowych schematów gięcia, pochodzą z raportu wygenerowanego automatycznie i poprawiono je tylko ze względów estetycznych. Aby obliczona ilość wymaganego zbrojenia była porównywalna z rzeczywistością, należało opracować odpowiedni algorytm. W utworzonym schemacie zamieszczono instrukcje postępowania programem oddzielnie w odniesieniu do prętów długości ponad 12 m (oznaczonych symbolem „LM” i pięciocyfrowymi numerami identyfikacyjnymi) oraz prętów pozostałych. W przypadku tych ostatnich nie było potrzeby podejmowania szczególnych działań i zastosowano standardowe pola danych wczytujące poszczególne informacje bezpośrednio z bazy danych modelu BIM. Pręty długie wymagały sporządzenia algorytmu rozpoznającego je po numerze identyfikacyjnym, który zapisano prostą instrukcją warunkową. Zmodyfikowano także algorytm komórki wyświetlającej łączne długości prętów i w konsekwencji całkowitą masę zbrojenia. Wprowadzona formuła szacuje liczbę zakładów niezbędnych do bezpiecznego połączenia prętów na podstawie średniej długości pręta, po czym, uwzględniając długość pojedynczego zakładu, dodaje odpowiednią wartość do pierwotnej ilości zbrojenia, zaczerpniętej z modelu BIM.

Nr	Wariant	Ilość	Stal	Średnica [mm]	Długość [mm]	Masa szt. [kg]	Masa [kg]	Kształt	Hak początek	Hak koniec	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	G [mm]	Średnica trzpienia	
																			Kształt
C4000	1	1349	B500NC	12	2365	2,1	2852	19	2	2	940	360	93	940	86			D=48	
C4001	1	498	B500NC	12	2435	2,2	1074,2	19	2	2	980	360	93	970	86			D=48	
C4002	1	938	B500NC	12	2465	2,2	2059,5	19	2	2	990	360	94	990	85			D=48	
C4003	1	440	B500NC	12	2485	2,2	967,8	19	2	2	1000	360	93	1000	86			D=48	
C4004	1	428	B500NC	12	2360	2,1	897,5	19	0	0	1000	405	91	1000	88			D=48	
C4005	1	411	B500NC	12	1715	1,5	87,57,9	19	2	2	660	365	103	560	75			D=48	
C4006	1	411	B500NC	12	1710	1,5	87,55,4	19	2	2	655	370	107	550	70			D=48	
C4007	1	428	B500NC	16	1855	2,9	1255,9	15	0	0	230	1650	220					D=64	
C4008	1	428	B500NC	16	1855	2,9	1253,5	15	0	0	230	1650	225					D=64	
C4009	1	5	B500NC	25	3000	11,5	57,7	0	0	0	2995								
SUMA				Ø5	Ø6	Ø8	Ø10	Ø12	Ø14	Ø16	Ø20	Ø25	Ø32	Ø40					
DŁUGOŚĆ [m]				0	0	0	0	10226	0	1588	0	15	0	0					
MASA [kg]				0	0	0	0	9092	0	2482	0	58	0	0					

Rys. 17. Przykład dokumentacji projektowej – zestawienie stali (fragment)

Podsumowanie

Postrzeganie metodologii BIM wyłącznie w kontekście oprogramowania nie jest właściwe, ponieważ jest to określenie wieloaspektowe i ma znacznie szersze oddziaływanie. Należy jednak podkreślić, że odpowiednie oprogramowanie wyraźnie zmniejsza nakłady pracy i poprawia komunikację, np. pomiędzy projektantami operującymi jednocześnie na tym samym modelu 3D.

Jednym z głównych elementów opracowanego modelu 3D jest model zbrojenia, w szczególności zbrojenia płyty pomostu. Na podstawie modelu 3D wykonano (wygenerowano) dokumentację rysunkową 2D i zestawienia stali zbrojeniowej, stosując funkcję automatycznego tworzenia widoków i przekrojów. Zwrócono także uwagę na projektowanie parametryczne oraz moduły i funkcje szczególnie przydatne podczas projektowania mostów lub wiaduktów, np. dodatek Beam Extruder. Przetestowano istotne funkcje i moduły programu Tekla Structures i na tej podstawie oceniono jego przydatność do projektowania żelbetowych obiektów mostowych. Skomplikowana forma pomostu oraz złożone zbrojenie umożliwiły dostrzeżenie zalet, ale i niedogodności podczas opracowywania modelu i generowania dokumentacji technicznej. Niżej przytoczono kilka uwag i wniosków wynikających z pracy nad projektem mostu żelbetowego z zastosowaniem metodologii BIM.

- Pomimo złożonej geometrii ustroju nośnego ze znacznym spadkiem podłużnym oraz przebiegiem drogi na łuku poziomym, udało się ją odwzorować w modelu BIM z zachowaniem akceptowalnych odchyień. Funkcja Beam Extruder umożliwiła zdyskretyzowanie ustroju nośnego, przybliżając jego krzywiznę siecznymi o odpowiednio dobranych długościach.
- Opracowano parametryczny przekrój poprzeczny pomostu umożliwiający uwzględnianie kolejnych zmian projektowych.

- Model oprócz geometrii konstrukcji zawiera także elementy wyposażenia obiektu, jak np. kotwy do montażu słupów oświetlenia, kanały kablowe oraz elementy bezpieczeństwa ruchu drogowego – barieroporce i balustrady.

- Model zbrojenia obejmuje kompletne zbrojenie całego obiektu: pręty główne, rozdzielcze, strzemiona poprzeczne, a także zbrojenie elementów drugorzędnych, takich jak np. gzymsy. Możliwa była więc wizualna kontrola zgodności rzeczywistego zbrojenia z projektowanym, poprzez pod-

gląd dowolnie zdefiniowanego widoku modelu 3D. Umożliwiło to zmniejszenie prawdopodobieństwa występowania błędów i kolizji oraz ich konsekwencji.

- Oprogramowanie Tekla Structures zapewniło spójność dokumentacji z modelem. Obiekty modelu, wraz z ich kolejnymi zmianami, były odzwierciedlane i aktualizowane na dokumentacji rysunkowej.

- Tekla Structures jest wyposażony w wiele funkcji wspomagających projektantów, także podczas tworzenia rysunków 2D, jak na przykład zakreślanie zmian w *chmury rewizji*, co przyczyniło się do zmniejszenia liczby defektów i niedociągnięć w opracowanej dokumentacji papierowej.

- Zakres komplikacji oraz czas niezbędny do sporządzenia projektu zależy w dużej mierze od charakterystyki obiektu oraz przyjętych założeń, szczególnie dotyczących rysunków zbrojeniowych. Nie ma jednej metody na odwzorowanie nawet nieskomplikowanej części konstrukcji w modelu. Każdy obiekt można zamodelować na wiele sposobów, jednak należy pamiętać o konsekwencjach stosowania konkretnych narzędzi. Wraz z doświadczeniem w doborze i operowaniu narzędziami, jakimi dysponuje Tekla Structures, nakład pracy, czasu i jakość opracowanej dokumentacji znacząco się poprawia.

- Specyfika pracy z programem Tekla Structures powoduje, że każdy następny projekt wymaga mniejszych nakładów pracy. Najbardziej pracochłonny jest pierwszy, ponieważ należy dostosować lub przygotować na nowo większość szablonów i schematów, jakie wykorzystuje oprogramowanie do oznaczania zbrojenia, wymiarowania konstrukcji itd. Na potrzeby projektu należało także dostosować szablony rysunków oraz tabele w dokumentacji. Przy projektowaniu kolejnych, analogicznych konstrukcji wystarczyłoby tylko uzupełnienie danych o projekcie/arkuszu we właściwościach programu, a informacje takie jak nazwa inwestora, lokalizacja lub wielkość skali itp. zostaną uzupełnione automatycznie zarówno w raportach, jak i rysunkach.

- Powstały model 3D mostu żelbetowego jest potwierdzeniem przydatności technologii i użyteczności oprogramowania Tekla Structures do kompleksowego modelowania obiektów inżynierskich według metodologii BIM oraz tworzenia tradycyjnej papierowej dokumentacji. Forma projektowanego obiektu była dość skomplikowana, ale pomimo to udało się opracować interaktywny, w pełni funkcjonalny model 3D zawierający zbiór dodatkowych informacji wraz z rysunkami oraz zestawieniami stali, które umożliwią sprawne wykonanie konstrukcji żelbetowej na placu budowy.

Reasumując, można stwierdzić, że część z wymienionych wyżej wad i niedogodności podczas projektowania mostu żelbetowego zgodnie z metodologią BIM i za pomocą oprogramowania Tekla Structures jest eliminowanych wraz z kolejnymi doświadczeniami użytkowników i udoskonalanymi wersjami oprogramowania. Wymaga to stosowania przez wszystkich producentów oprogramowania odpowiednich formatów i standardów umożliwiających bezbłędną wymianę informacji. Obecny etap rozwoju

oprogramowania jeszcze tego nie zapewnia, w szczególności w odniesieniu do budownictwa infrastrukturalnego. Brak wypracowanych standardów modelowania infrastruktury drogowo-mostowej dodatkowo uniemożliwia pełną współpracę między programami oraz między branżami.

Oczekiwania dotyczące metodologii BIM są czasami zbyt optymistyczne. Dlatego istnieje również liczne grono zawiedzionych użytkowników [19].

PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Alliance for Interoperability: Industry Foundation Classes, 2007. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/> [z 05-12-2017].
- [2] BuildingSMART International Ltd.: Participants – Welcome to buildingSMART-Tech.org, Plone & Python. <http://www.buildingsmart-tech.org/certification/ifc-certification-2.0/ifc2x3-cv-v2.0-certification/participants> [z 04-01-2018].
- [3] *Czmoch I.*: O niektórych uwarunkowaniach wdrożenia BIM w Polsce. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 8/2017.
- [4] *Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K.*: BIM Handbook: a Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [5] *Fukai D.*: 3 Myths of BIM (for Constructors); 3D Construction Modeling, 11-08-2011. <https://insitebuilders.wordpress.com/2011/08/10/3-myths-of-bim-for-constructors> (z 22-12-2017).
- [6] *Jasiński M., Płaszczek T., Salamak M.*: Modelowanie geometrii wybranych elementów konstrukcji podpór obiektów mostowych w technologii BIM. „Mosty”, nr 5/2016.
- [7] *Kulig J.*: BIM – jak efektywnie wdrożyć technologię BIM. Ogólnopolska konferencja InfraBIM – BIM w infrastrukturze drogowej i kolejowej. Gliwice, 8–9 listopada 2016.
- [8] *Olszewski T., Sypek M.*: Praktyczne wykorzystanie BIM w mostownictwie. Wydawnictwo SIGMA – NOT Sp. z o.o., Warszawa 2016.
- [9] *Piechowiak Sz.*: Działania podejmowane przez Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa w obszarze metodyki BIM. Ogólnopolska konferencja InfraBIM – BIM w infrastrukturze drogowej i kolejowej. Gliwice, 8-9 listopada 2016.
- [10] *Piwkowski W.*: Fenomen V4 BIM Task Group. Ogólnopolska Konferencja InfraBIM – BIM w Infrastrukturze Drogowej i Kolejowej. Gliwice, 8–9 listopada 2016.
- [11] PKP PLK S.A.: Pełnienie funkcji konsultanta w związku z przygotowaniem i realizacją dokumentacji projektowej wraz z pełnieniem nadzoru autorskiego pilotażowego projektu wykorzystującego technologię BIM. SIWZ, Warszawa, styczeń 2018.
- [12] PN-EN 1991-2:2007 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje – Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- [13] PN-EN ISO 3766:2006 Rysunek budowlany – Uproszczony sposób przedstawiania zbrojenia betonu.
- [14] PN-S-10030:1985 Obiekty mostowe – Obciążenia.
- [15] *Raczyński M.*: Zastosowanie Tekla Structures w mostownictwie na przykładzie mostowego obiektu żelbetowego. Praca dyplomowa magisterska. PW WIL, Warszawa, lipiec 2018.
- [16] *Salamak M., Januszka M.*: BIM models and augmented reality for concrete bridge inspections. 11th CCC Congress, Hamburg 2015.
- [17] *Siwowski T., Michalak E., Sobala D., Kulpa M., Janas L., Trojnar K., Duda A.*: Projektowanie mostów według eurokodów. Pod redakcją *Tomasza Siwowskiego*. Elamed, Katowice 2016.
- [18] SOFISTIK v.2014. Podręcznik użytkownika. SOFISTIK AG. Oberschleissheim, Niemcy, 2016.
- [19] *Tomana A.*: BIM – innowacyjna technologia w budownictwie: podstawy, standardy, narzędzia. Kraków, Warszawa, PWB Media Zdziebiowski, 2016.
- [20] Trimble Solutions Corporation: Advanced Software for Construction/ Tekla. <https://www.tekla.com/about/about#> [z 04-01-2018].