

dr hab. inż. Wojciech Trochymiak^{1*)}

ORCID: 0000-0002-9099-9457

mgr inż. Maciej Wierzbowski²⁾

mgr inż. Przemysław Mossakowski¹⁾

ORCID: 0000-0003-4173-6762

Analysis of the design of a replacement motorway viaduct

Analiza projektu zamiennego wiaduktu autostradowego

DOI: 10.15199/33.2025.07.19

Abstract. The main goal of the article is to describe the results of the case study on the design of an alternative variant of a post-tensioned concrete motorway viaduct, located in one of the most important motorway junctions in Poland. The study included the design of the viaduct's supporting structure (at the level of the technical design, with the output parameters of the existing structure), based on the currently applicable regulations, and a comparative analysis of the existing structure with the alternative variant. The analyses carried out confirmed the feasibility of the proposed variant, indicating the necessary works enabling the construction of a new structure on the rebuilt supports. The conclusions contain practical references regarding the potential replacement, if necessary, of the existing supporting structure with the alternative variant.

Keywords: prestressed concrete; post-tensioned road viaduct; comparative analysis.

Streszczenie. W artykule opisano wyniki prac studialnych dotyczących alternatywnego projektu kablobetonowego wiaduktu autostradowego, usytuowanego w jednym z najważniejszych węzłów autostradowych w Polsce. Prace te obejmowały zaprojektowanie konstrukcji nośnej wiaduktu (na poziomie projektu technicznego, o parametrach wyjściowych już istniejącej konstrukcji), na podstawie obecnie obowiązujących przepisów, wraz z analizą porównawczą istniejącej konstrukcji z wariantem alternatywnym. Przeprowadzone analizy potwierdziły realność zaproponowanego wariantu ze wskazaniem niezbędnych prac umożliwiających budowę nowej konstrukcji na przebudowanych podporach. Wnioski zawierają praktyczne odniesienie dotyczące potencjalnej zamiany, w razie potrzeby, istniejącej konstrukcji nośnej na wariant alternatywny.

Słowa kluczowe: beton sprężony; kablobetonowy wiadukt drogowy; analiza porównawcza.

The Polish bridge engineering community has seen numerous discussions regarding the type of bridge structures to be built along or above expressways [1 ÷ 4]. In most cases these are two-span structures (flyovers) made of in situ concrete or prefabricated beam structures, or slab structures. In typical situations, it is more justified to use a beam cross-section due to the lower weight of the structure and better use of the cross-section's load-bearing capacity. Non-standard solutions are required in specific cases, e.g. in the case of skew structures, large spans or landmark structures.

The article concerns the superstructure of flyovers marked as WA244 bridge structures, located at the intersection of the A1/A2 motorways at the motorway junction near Łódź (photo, Figures 1 and 2). The design and the analytical works focused on designing alternative superstructures for the flyovers under the carriageways of the A1 motorway (Figure 3), while also conducting a multi-faceted comparative analysis which compared the new design with the existing structures [5]. The replacement design and results of the analysis are a "derivative" of the expert work concerning the existing damage to the structure, in particular the damage underneath the carriage-



The structure of the existing viaduct [6]
Konstrukcja wiaduktu istniejącego [6]

W środowisku polskich inżynierów mostowych wielokrotnie dyskutowano, jakiego typu obiekty mostowe budować w ciągu lub nad drogami szybkiego ruchu [1 ÷ 4]. Najczęściej są to konstrukcje (wiadukty) dwuprzęsłowe z betonu in situ lub prefabrykowane belkowe bądź płytowe. W typowych sytuacjach bardziej uzasadnione jest stosowanie przekroju belkowego, ze względu na mniejszy ciężar konstrukcji oraz lepsze wykorzystanie nośności przekroju. W sytuacjach nietypowych, jak obiekty w skosie, duża rozpiętość przęsła czy obiekty landmark, wymagane jest zastosowanie nietypowego rozwiązania.

Artykuł dotyczy konstrukcji nośnej wiaduktów oznaczonych jako obiekty mostowe WA244, usytuowanych na skrzyżowaniu autostrad A1/A2 w obrębie węzła autostradowego pod Łodzią (fotografia, rysunki 1 i 2). Prace projektowe i analityczne dotyczyły zaprojektowania (projekt zamienny) alternatywnych konstrukcji nośnych wiaduktów pod jezdniami autostrady A1 (rysunek 3) wraz z wieloaspektową analizą porównawczą z istniejącymi konstrukcjami [5]. Projekt zamienny i wyniki analiz są „pochodną” prac eksperckich dotyczących uszkodzeń, szczególnie wiaduktu pod jezdnią A1 w kierunku do Katowic [6].

Istniejący obiekt, na podstawie którego przyjęto dane do projektowania obiektu zamiennego i analiz, składa się z trzech wiaduktów typu extradosed (ex-d) [4] i został zaprojektowany oraz zbudowany przed EURO 2012. Po kilku latach eksploatacji stwierdzono uszkodzenia różnych elementów konstrukcji no-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Arcadis Sp. z o.o.

*) Correspondence address: wojciech.trochymiak@pw.edu.pl

geway of the flyover which is an element of the A1 motorway in the direction of Katowice [6].

The existing structure, on which the data for the design of the replacement structure and the analyses are based, consists of three extradosed (ex-d) type flyovers [4] and it was designed and built before EURO 2012. After several years of operation, damage to various elements of the superstructure was discovered. Publication [5] attempted to answer one of the questions troubling the bridge construction community, i.e. what structure could replace the existing flyover. It could be a replacement design that would be placed in the situational, soil and geometrical setting of the original design. In order to answer this question, publications on the topic were studied and

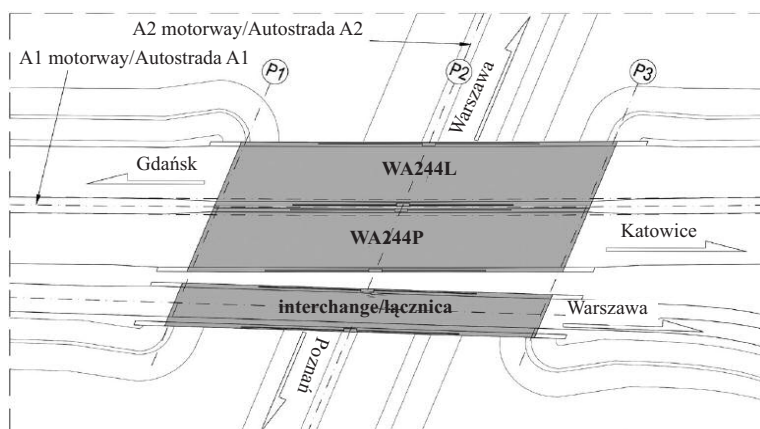


Fig. 1. Site plan of the existing WA244 facility [5]

Rys. 1. Plan sytuacyjny istniejącego obiektu WA244 [5]

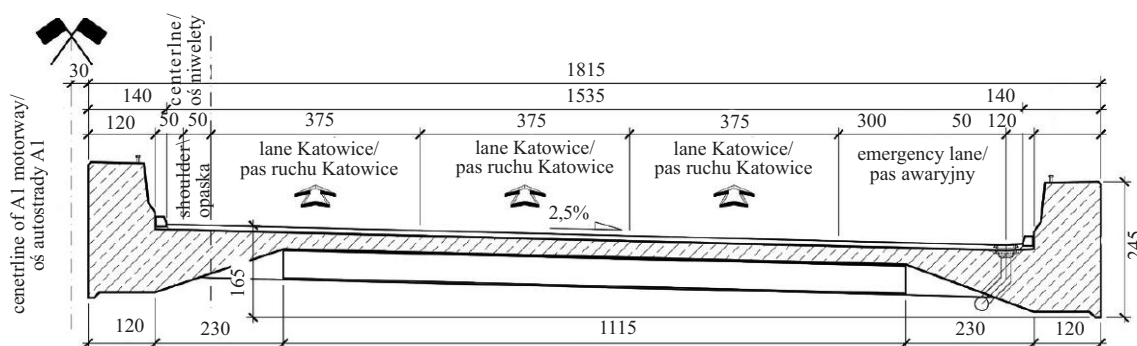


Fig. 2. Dimensions of the span cross-section of the existing viaduct WA244P [6]

Rys. 2. Wymiary przesłowego przekroju poprzecznego wiaduktu istniejącego WA244P [6]

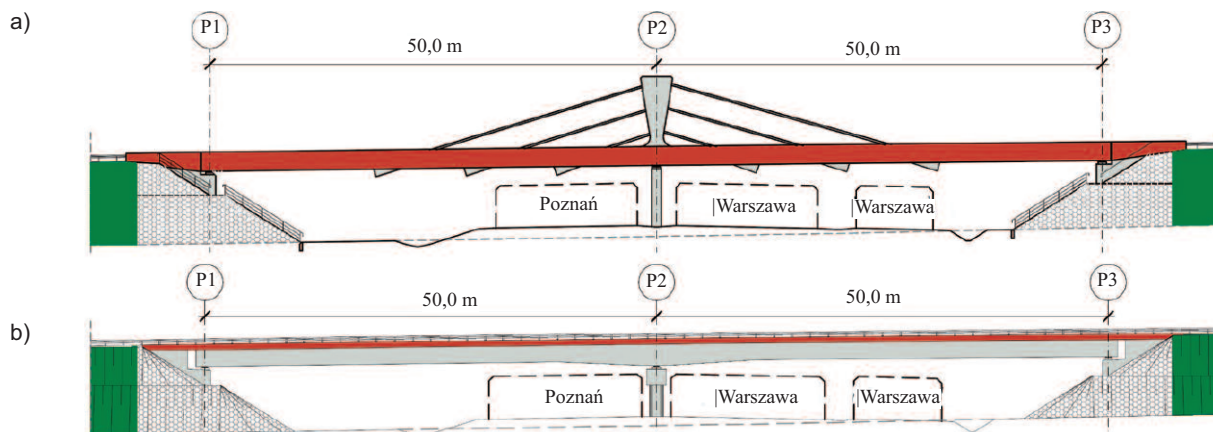


Fig. 3. Diagrams of the compared design variants; a) initial (existing) variant [6]; b) replacement variant [5]

Rys. 3. Schematy porównywanych wariantów konstrukcji; a) wariant wyjściowy (istniejący) [6]; b) wariant zamienny [5]

conceptual as well as design-related and analytical works were carried out. **An alternative concept, in the form of a post-tensioned concrete beam-slab structure, was proposed.** In order to demonstrate the correctness of the designed superstructure, having the spatial layout which is analogous to the existing design as well as featuring appropriate prestressing of the girders with internal tendons with bond, detailed calculations were performed "manually", in reliable cross-sections, regarding individual elements of the bridge (girder, bridge deck, crossbeam, brackets). The second stage of the analyses concerned modeling of the superstructure (bridge)

szej. W [5] podjęto próbę odpowiedzi na jedno z pytań nurtujących środowisko mostowców, jakim obiektem zamiennym można zastąpić istniejący wiadukt. Aby odpowiedzieć na to pytanie, wykonano studia literaturowe, prace koncepcyjne i projektowe oraz analityczne. **Zaproponowano koncepcję zamienną w postaci kablobetonowej konstrukcji belkowo-płytovej.** W celu wykazania poprawności zaprojektowanej konstrukcji nośnej, o układzie geometrycznym w planie analogicznym jak obiekt istniejący, i odpowiednim sprzężeniu dźwigarów ciągłymi wewnętrznymi z przyczepnością, wykonano „ręcznie” szczegółowe obliczenia, w miarodajnych prze-

while using the SOFiStiK program and performing several dozen iterative calculations to verify in detail the fulfillment of all requirements for this type of structures, as stipulated by the currently applicable regulations.

Characteristics of the analyzed structures

The original structure was defined as two flyovers, WA244L and WA244P, which were designed along the A1 motorway while observing the regulations [7, 8] and standards [9 ÷ 11] that are valid for load class A facilities according to [9]. The superstructure is a slab-beam bridge which is prestressed with internal tendons with bonding and external tendons of the ex-d type. Two externally located post-tensioned concrete girders are connected with the crossbeams by a reinforced concrete bridge deck: span – composite crossbeams (steel, concrete) which are integrated with the bridge deck; supporting crossbeams above the abutments (P1 and P3) – made of concreted steel sections; and crossbeams installed above the intermediate support (P2) – made reinforced concrete slab with increased thickness.

The superstructure is set on the supports while using pot bearings – 2 bearings on each support. Massive, reinforced concrete abutments with side walls, placed indirectly on $\phi 1500$ mm piles, 12.00 meters long (18 pieces under each abutment), have been aligned to the slope inclination. Pier (P2), located in the median strip of the A2 motorway, have the shape of trapezoidal, wall pillars (poles) and are placed on $\phi 1500$ mm piles that are 21 meters long (18 pieces under the foundation strip). The roadway on the flyovers has a one-sided cross slope. The main girders are shaped in such a way that they simultaneously constitute concrete protective barriers with attached steel handrails. The barriers at the end of the facility are connected to the road barriers.

The internal tensioning of the girders consists of tendons made of seven-wire strands (25L, 15.7 mm Y1860 steel), while the external tensioning (ex-d tendons), in a fan configuration, consists of seventy-three 15.7 mm galvanized strands, in individual casings, placed in a casing pipe made of HDPE. The active anchors are located in anchor blocks at the bottom of the structure. Saddles placed inside the pylons allow the route of the ex-d tendons to be changed and constitute a kind of passive anchorage. The height of the pylons, above the level of the upper surface of the bridge, is 7.50 m, and their cross-section is variable, widening upwards, with the following dimensions: $1.50 \div 3.50$ m x 0.90 m. The pylons were connected monolithically to the bridge girders. The superstructure was built using stationary scaffolding.

In order to compare the original design with the alternative design, data determined on the basis of, among others, the calculation model presented in Figure 4 were adopted and are summarized in Table 1. Due to the symmetry of both superstructures (left roadway

krojach, poszczególnych elementów pomostu (dźwigar, płyta pomostu, poprzecznicza, wsporniki). Drugi etap analiz dotyczył zamodelowania konstrukcji nośnej (pomostu) za pomocą programu SOFiStiK i wykonania kilkudziesięciu iteracyjnych obliczeń, aby szczegółowo zweryfikować spełnienie wszystkich wymagań dotyczących tego typu konstrukcji, wg obecnie obowiązujących przepisów.

Charakterystyka analizowanych obiektów

Obiektem wyjściowym nazwano dwa wiadukty WA244L i WA244P w ciągu autostrady A1, zaprojektowane zgodnie z przepisami [7, 8] i normami [9 ÷ 11] na klasę obciążenia A wg [9]. Konstrukcję nośną stanowi pomost płytowo-belkowy sprężony kablami wewnętrznymi z przyczepnością i kablami zewnętrznymi typu ex-d. Dwa kablobetonowe, zewnętrznie usytuowane, dźwigary łączy żelbetowa płyta pomostu z poprzecznikami: przęsłowymi – stalowe, zespolone z płytą pomostu; podporowymi nad przyczółkami (P1 i P3) – z obetonowanych kształtowników stalowych; nad podporą pośrednią (P2) – płyty żelbetowe o powiększonej grubości.

Ustrój nośny został oparty na podporach za pomocą łożysk garnekowych – po 2 łożyska na każdej podporze. Masywne, żelbetowe przyczółki ze ścianami bocznymi, posadowione pośrednio na palach $\phi 1500$ mm, długości 12,00 m (18 szt. pod każdym przyczółkiem), dostosowano do pochylenia skarp. Podpory pośrednie (P2) usytuowane w pasie rozdziálu autostrady A2, mają kształt trapezowych, ściankowych filarów (słupów) i posadowiono je na palach $\phi 1500$ mm, długości 21 m (18 szt. pod ławą fundamentową). Jezdnia na wiaduktach ma jednostronny spadek poprzeczny. Dźwigary główne są tak ukształtowane, że jednocześnie stanowią betonowe bariery ochronne z zamocowanymi poręczami stalowymi. Bariery na końcu obiektu połączono z barierami drogowymi.

Sprężenie wewnętrzne dźwigarów stanowią kable z siedmiodrutowych splotów 25L, 15,7 mm ze stali Y1860, natomiast sprężenie zewnętrzne (ciągna ex-d), w układzie wachlarza, składa się z siedemdziesięciu trzech splotów galwanizowanych 15,7 mm, w indywidualnych osłonkach, umieszczonych w rurze osłonowej z HDPE. Zakotwienia czynne są usytuowane w blokach kotwiących na spodzie konstrukcji. Siodła umieszczone wewnątrz pylonów umożliwiają zmianę trasy cięgien ex-d i stanowią swego rodzaju zakotwienia bierno. Wysokość pylonów, ponad poziom górnej powierzchni pomostu, wynosi 7,50 m, a ich przekrój jest zmienny, poszerzając się ku górze i wynosi $1,50 \div 3,50$ x 0,90 m. Pylony zostały połączone monolitycznie z dźwigarami pomostu. Konstrukcję nośną zbudowano za pomocą rusztowań stacjonarnych.

W celu porównania projektu wyjściowego z projektem zamiennym przyjęto dane wyznaczone na podstawie m.in. modelu obliczeniowego przedstawionego na rysunku 4 i zestawiono je w tabeli 1. Ze względu na symetrię obu ustrojów nośnych (jezdnia lewa i jezdnia pra-

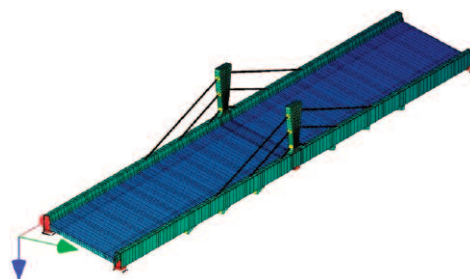


Fig. 4. Visualization of the computational model of the initial design [6]

Rys. 4. Wizualizacja modelu obliczeniowego projektu wyjściowego [6]

Table 1. Summary of estimated load of dead weight and equipment of the initial object [5]

Tabela 1. Zestawienie szacunkowego obciążenia ciężarem własnym i wyposażenia obiektu wyjściowego [5]

Element	Unit weight/Ciężar jednostkowy		Load/Obciążenie		
	V [kN/m³]/O [kN/m³]	L [kN/m]	S [kN/m²]/P [kN/m²]	L [kN/m]	T [kN]/C [kN]
Mass of the structure/Masa konstrukcji	–	–	–	–	33150,00
Equipment elements [per superstructure]/Elementy wyposażenia [na jeden ustrój]					
Drainage/Odwodnienie	–	0,50	–	0,50	51,00
Expansion joint devices/Urządzenia dylatacyjne	–	0,50	–	1,00	72,96
Deck insulation/Izolacja pomostu	23,00	–	0,23	4,28	436,83
Curb sub-base/Podbudowa krawężnika	19,00	–	0,02	0,30	31,01
Curb/Krawężnik	27,00	–	0,12	2,16	220,32
Railing/Balustrada	–	0,50	–	0,50	51,00
Roadway surface/Nawierzchnia jezdni	23,00	–	2,19	33,32	3398,77
Total load exerted by the weight of the structure and the equipment on a superstructure/Obciążenie całkowite ciężarem konstrukcji i wyposażenia jednego ustroju nośnego					37 400,00

Markings/Oznaczenia: V – volumetric/O – objętościowy; L – lineary (-e)/liniowy (-e); S – surface/P – powierzchniowe; T – total/C – całkowite

and right roadway) and the clarity of the data, the lists of the materials used concern only one superstructure.

Consumption of the most important materials for one bridge deck: structural concrete for the superstructure (C50/60) – 1380 m³ (including self-compacting concrete in pylons: 34 m³); reinforcing steel (A-IIIIN) – 431 t; prestressing steel of internal tendons (Y1860, 25L15.7) – 71110 kg; prestressing steel of external tendons (Y1860, 73L15.7) – 25729 kg; structural steel 18G2A: crossbeams – 140 t; anchor blocks – 23.15 t; formwork pipes – 18.60 t; deviator steel (S355) – 1.85 t; active anchors for internal tendons – 48 pcs.; active anchors for external tendons – 12 pcs.; HDPE pipes with filler (anti-corrosion protection of external tendons) – 135 m; fixed pot bearings (load capacity 21,000 kN) – 1 pc.; unidirectional sliding pot bearings (load capacity 5,500 kN) – 2 pcs.; multidirectional sliding pot bearings (load capacity 21,000 kN) – 1 pc.; multidirectional sliding pot bearings (load capacity 5,500 kN) – 2 pcs.; single-module expansion joint devices (nominal displacement 80 mm) – 36.30 m.

The replacement structure (flyovers along the A1 route – without the “interchange” flyover) was designed while taking into account the location and the position of the original structure, the course of the A1 motorway in the plan and its gradeline, as well as the theoretical spans and required clearances above the structure and underneath the structure. In relation to the original structure, the type of superstructure and the width of the cross-section of the structure were changed. The cross-section was adapted to the current legal status (2024) [12] and the design principles according to Eurocodes [13-16]. The replacement structure was designed for the load class I according to PN-EN 1991-2 + 150 norm, STANAG 2021. It is a two-span, skew, beam-plate post-tensioned concrete structure, supported on bearings (Figures 3b, 5 and 6).

The superstructure of the spans consists of two symmetrical beam-plate structures, prestressed with internal bonded tendons. Each superstructure consists of three beams with a variable height of 220 – 270 cm. The beams (girders) are topped with a 25 ÷ 35 cm – thick reinforced concrete slab with supports that are 279.5 cm long and 25 ÷ 40 cm thick. Reinforced concrete crossbeams with dimensions of 200 x 150 cm

wa) oraz przejrzystość danych wykaz materiałów obejmuje jeden ustrój nośny.

Zużycie najważniejszych materiałów jednego pomostu: beton konstrukcyjny ustroju nośnego (C50/60) – 1380 m³ (w tym beton samozagęszczalny w pylonach 34 m³); stal zbrojeniowa (A-IIIIN) – 431 t; stal sprężająca kabli wewnętrznych (Y1860, 25L15,7) – 71110 kg; stal sprężająca kabli zewnętrznych (Y1860, 73L15,7) – 25729 kg; stal konstrukcyjna 18G2A odpowiednio: poprzecznice – 140 t; bloki kotwiące – 23,15 t; rury szalunkowe – 18,60 t; stal dewiatorów (S355) – 1,85 t; zakotwienia czynne kabli wewnętrznych – 48 szt.; zakotwienia czynne kabli zewnętrznych – 12 szt.; rury HDPE z wypełnieniem (zabezpieczenie antykorozyjne kabli zewnętrznych) – 135 m; stałe łożysko garnkowe (nośność 21000 kN) – 1 szt.; łożyska garnkowe jednokierunkowo przesuwne (nośność 5500 kN) – 2 szt.; łożysko garnkowe wielokierunkowo przesuwne (nośność 21000 kN) – 1 szt.; łożyska garnkowe wielokierunkowo przesuwne (nośność 5500 kN) – 2 szt.; jednomodułowe urządzenia dylatacyjne (nominalny przesuw 80 mm) – 36,30 m.

Obiekt zamienny (wiadukty w ciągu A1 – bez łącznicy) zaprojektowano zgodnie z lokalizacją i usytuowaniem obiektu wyjściowego, przebiegiem autostrady A1 w planie i jej niweletą, rozpiętościami teoretycznymi prześel oraz wymaganymi skrajniami na i pod obiektem. W odniesieniu do obiektu wyjściowego zmieniono rodzaj konstrukcji nośnej oraz szerokość przekroju poprzecznego ustroju. Dostosowano przekrój do aktualnego stanu prawnego (2024 r.) [12] oraz zasad projektowania wg Eurokodów [13 ÷ 16]. Obiekt zamienny zaprojektowano na I. klasę obciążenia wg norm PN-EN 1991-2 + 150 i STANAG 2021. Jest to dwuprzęsłowa, usytuowana w skosie, belkowo-płytkowa konstrukcja kablobetonowa, oparta na łożyskach (rysunki 3b, 5 i 6).

Konstrukcję nośną prześel stanowią dwie symetryczne konstrukcje belkowo-płytkowe, sprężone kablami wewnętrznymi z przyczepnością. Każdy ustrój nośny składa się z trzech belek o zmiennej wysokości 220 – 270 cm. Belki (dźwigary) zwieńcza płyta żelbetowa grubości 25 ÷ 35 cm z wspornikami długości 279,5 cm i grubości 25 ÷ 40 cm. Nad podporami (P1 ÷ P3) zaprojektowano żelbetowe poprzecznice o wymiarach 200 x 150 cm. Sprężenie podłużne dźwigarów (rysun-

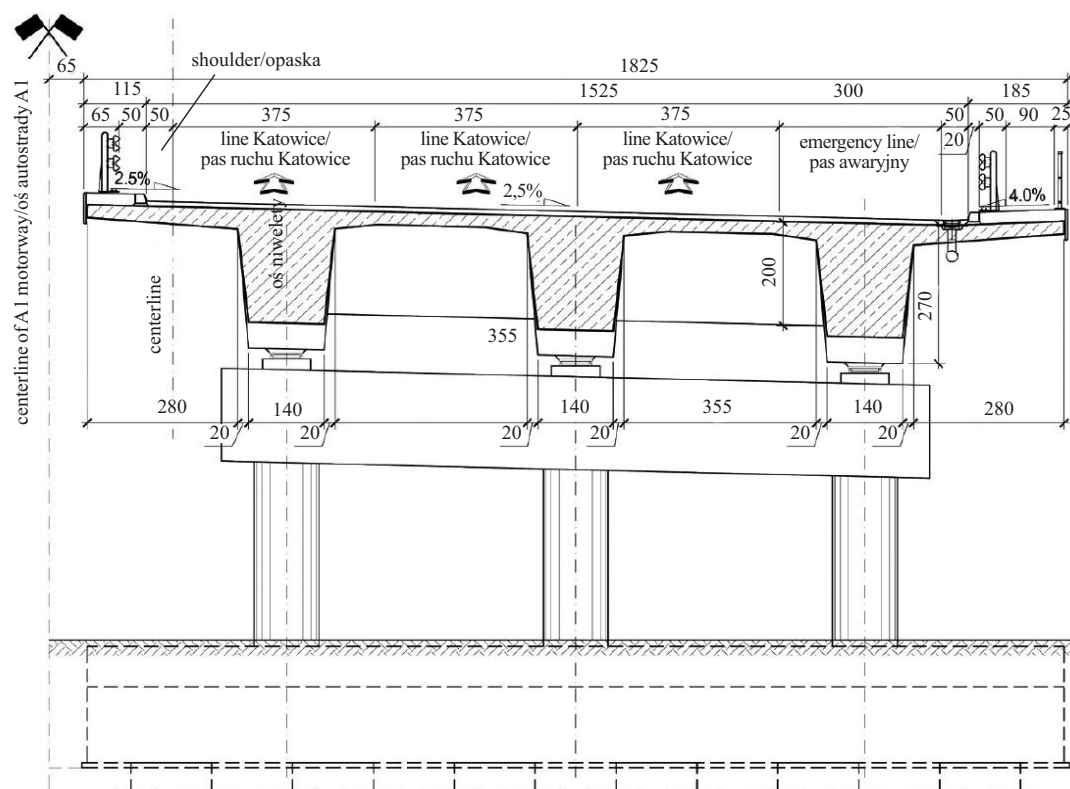


Fig. 5. Cross-section of the replacement design span with a view of the intermediate support (P2) [5]

Rys. 5. Przekrój poprzeczny przęsłowy z widokiem na podporę pośrednią (P2) [5]

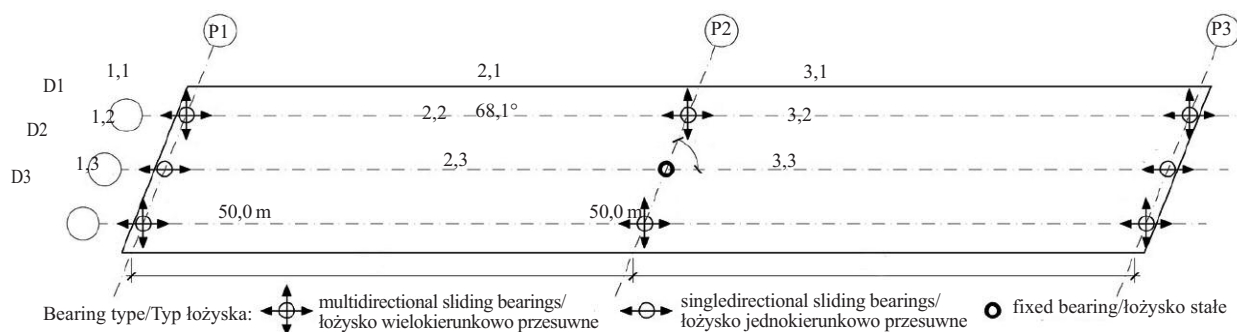


Fig. 6. Schematic diagram of the bearing of the replacement viaduct [5]

Rys. 6. Schemat łożyskowania wiaduktu zamiennego [5]

have been designed above the supports (P1 ÷ P3). The longitudinal prestressing of the girders (Figure 7) consists of internal bonded tendons, made of seven-wire strands of Y1860 steel, tensioned on both sides (active anchorages at both ends of the supporting structure). Each superstructure rests on supports using pot bearings set on bearing blocks.

The replacement structures were designed with equipment typical for this type of structures. Single-module sealed expansion joints, stone bridge curbs anchored in the overhangs, prefabricated polymer concrete cornice boards, steel railings and handrails with appropriate parameters were used.

It was assumed that the replacement structure would be erected using the traditional method and system formwork (no analysis was made of the works preceding the construction of the replacement structure in place of the existing structure!), following demolition of the existing structure. The following works were

kek 7) stanowią iniektowane kable wewnętrzne, z siedmiodrutowych splotów ze stali Y1860, naprężane obustronnie (zakotwienia czynne na obu końcach ustroju nośnego). Każdy ustrój nośny opiera się na podporach za pomocą łożysk garnkowych ustawionych na ciosach podłożyskowych.

Obiekty zamienne zaprojektowano z typowym, w przypadku tego typu konstrukcji, wyposażeniem. Zastosowano jedno-modułowe szczelne urządzenia dylatacyjne, kamienne krawężniki mostowe zakotwione w kapach, prefabrykowane deski gzymsowe z polimerobetonu, stalowe balustrady i barieroporcze o odpowiednich parametrach.

Przyjęto, że obiekt zamienny będzie wznoszony metodą tradycyjną z zastosowaniem deskowań systemowych (nie analizowano prac poprzedzających budowę obiektu zamiennego w miejscu obiektu istniejącego!) po uprzednim wyburzeniu istniejącego. Podczas budowy obiektu prze-

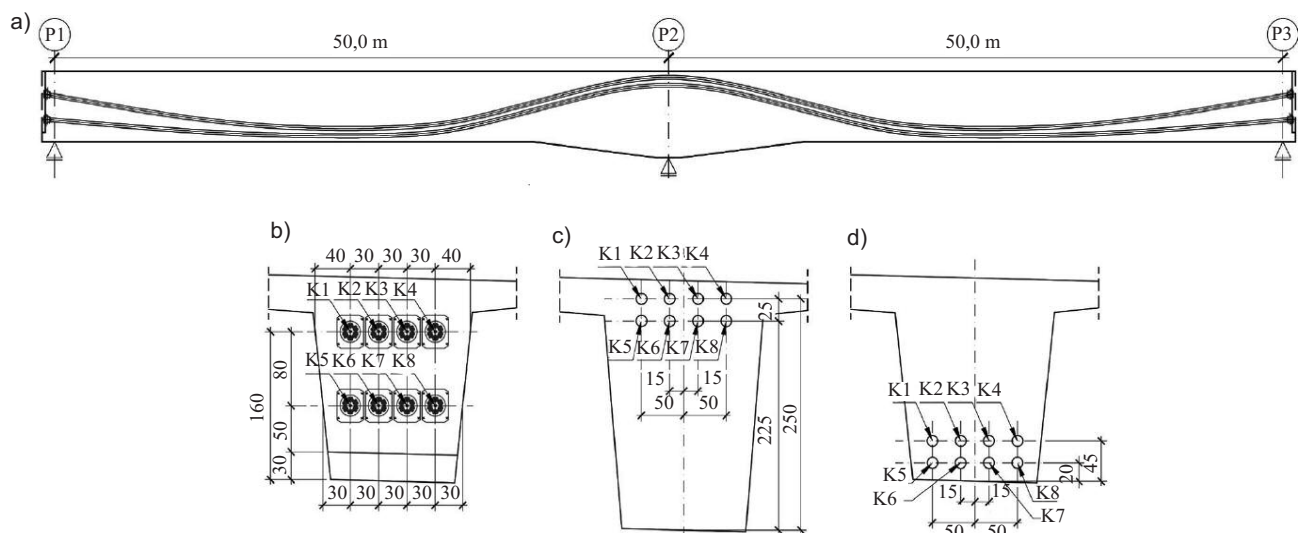


Fig. 7. Schematic diagram of the prestressing tendon routes in the exemplary girder [5]; a) side view; b) view of the anchorage zone; c) cross-section in the axis of the P2 support; d) cross-section of the span

Rys. 7. Schemat układu tras cięgien sprężających w przykładowym dźwigarze [5]; a) widok z boku; b) widok na strefę zakotwień; c) przekrój poprzeczny w osi podpory P2; d) poprzeczny przekrój przęsła

planned during the construction of the structure: construction of the spans of the superstructure (without prestressing); prestressing of the superstructure; construction of the back walls and filling the space behind the abutments to the full height together with the construction of transition slabs; laying the pavement on the structure and installation of equipment.

For the purpose of the static and strength analysis, a numerical model of the superstructure was developed (using SOFiSTiK program). The beam-shell, parametric FEM model (finite element method) of class e1+e2, p3 consists of bar elements (girders, crossbeams) and surface elements (plate, brackets) (Figure 8). The components were located in accordance with their actual position by using offsets. The support points (the bearings) were located at the bottom of the girders. In order to avoid doubling the stiffness of the plate, i.e. the surface element, and the girder, i.e. the beam element, a T-BEAM module was used, which eliminated the longitudinal stiffness of the plate. In the static analysis the effect of prestressing was considered as a system of equivalent loads. The immediate and rheological losses of the prestressing force were determined using the software module designed for the analysis of the structure's operating phases.

widziano wykonanie: konstrukcji przęseł ustroju nośnego (bez sprężenia); sprężenie ustroju nośnego; ścianek zapleczy i zasypanie przestrzeni za przyczółkami do pełnej wysokości wraz z realizacją płyt przejściowych, nawierzchni na obiekcie oraz montażu wyposażenia.

Na potrzeby analizy statyczno-wytrzymałościowej opracowano model numeryczny konstrukcji nośnej (program SOFiSTiK). Belkowo-powłokowy, parametryczny model MES (metoda elementów skończonych) klasy e1+e2, p3 składa się z elementów prętowych (dźwigary, poprzecznice) i powierzchniowych – płyta, wsporniki (rysunek 8). Elementy składowe zostały zlokalizowane zgodnie ze swoim rzeczywistym położeniem przez zastosowanie offsetów. Miejsca podparcia – łożyska usytuowano na spodzie dźwigarów. W celu uniknięcia zdublowania sztywności płyty – elementu powierzchniowego i dźwigara – elementu belkowego zastosowano moduł T-BEAM, który niweluje sztywność podłużną płyty. Oddziaływanie sprężenia w analizie statycznej rozpatrywano jako układ obciążeń zastępczych. Straty doraźne i reologiczne siły sprężającej wyznaczono, korzystając z modułu oprogramowania przeznaczonego do analizy faz pracy konstrukcji.

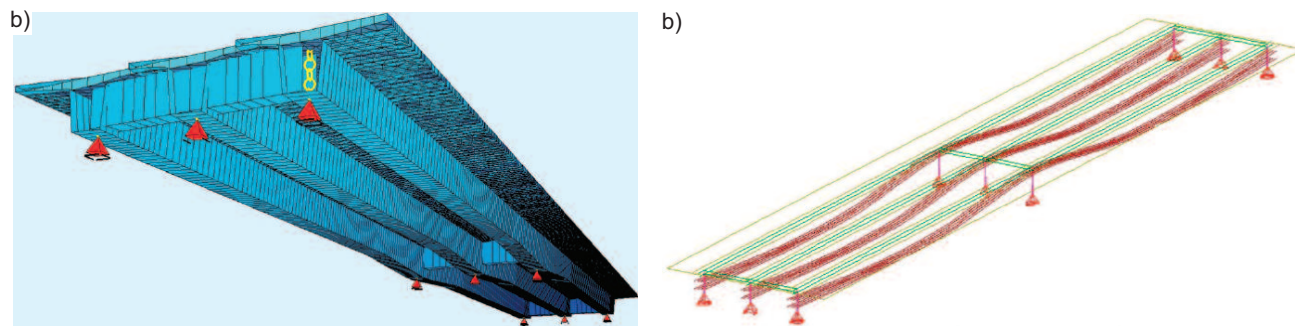


Fig. 8. Visualization of the calculation model of the replacement design [5]; a) geometry model; b) model of the prestressing tendon routes

Rys. 8. Wizualizacja modelu obliczeniowego projektu zamiennego [5]: a) model geometrii; b) model tras cięgien sprężających

The static and strength analysis of the superstructure covered the following elements: the girders (prestressed element), the deck slab, the supports and the support crossbeams. All load conditions which may potentially occur in the modelled elements were taken into account. The following phases of the structure's operation were considered:

- **construction phase "0"**: self-weight of the structure; prestressing (initial prestressing force accounting for temporary losses);

- **unused (non-operational) phase "1"**: self-weight of the structure; self-weight of the equipment elements; prestressing (initial prestressing force accounting for temporary losses and partial rheological losses);

- **usable (operational) phase "2"**: self-weight of the structure; self-weight of the equipment elements; prestressing (permanent prestressing force – after accounting for the temporary losses and rheological losses after 100 years); moving loads; settlement of supports; thermal effects; wind effects.

The scope of design work for the girder included the following elements: selection of construction materials; list of loads and impacts; determination of internal forces; calculation of the geometrical characteristics of the cross-section; design of the prestressing (prestressing forces, tendon routes and losses of prestressing forces); calculation of the final geometrical characteristics of the cross-section; design of the reinforcement; verification of the SLS and ULS limit states and deflections. In the case of the deck slab, crossbeam and cantilevers the scope of calculations included: selection of construction materials; list of loads and impacts; determination of internal forces; design of the reinforcement; verification of the SLS and ULS limit states and verification of deflections. The report on the performed static and strength analyses is included in the publication [5]. The consumption of the most important materials for one deck was as follows: structural concrete of the superstructure (C50/60) – 1660 m³; reinforcing steel (A-IIIIN) – 240 t; prestressing steel (Y1860, 27L15.7) – 78121 kg; active anchorages of prestressing tendons – 48 pcs.; fixed pot bearing (load capacity 9000 kN) – 1 pc.; unidirectional sliding pot bearings (load capacity 4000 kN) – 2 pcs.; unidirectional sliding pot bearings (load capacity 12000 kN) – 2 pcs.; multidirectional sliding pot bearings (load capacity 5000 kN) – 4 pcs.; single-module expansion joints (nominal displacement of 80 mm) – 36.48 m.

Comparative analysis of the original and replacement design

Table 2 presents the technical and economic indicators of consumption of construction materials in the original design (O.D.) and in the replacement design (R.D.). In order to compare the response to the load exerted by the foundation, the mass of the structure and of the equipment elements used in the original design and its distribution on the bearings were estimated. In the original design, there are two bearings on each support under one deck, and in the replacement design there are three bearings respectively. The analysis of the replacement design showed that the proportion of the total mass distribution

Analiza statyczno-wytrzymałościowa ustroju nośnego obejmowała: dźwigary (element sprężony), płytę pomostu, wsporniki i poprzecznice podporowe. Uwzględniono wszystkie stany obciążenia, które mogą zaistnieć w modelowanych elementach. Rozpatrzono następujące fazy pracy konstrukcji:

- **faza budowy „0”**: ciężar własny konstrukcji; sprężenie (początkowa siła sprężająca z uwzględnieniem strat doraźnych);

- **faza bezużytkowa „1”**: ciężar własny konstrukcji; ciężar własny elementów wyposażenia; sprężenie (początkowa siła sprężająca z uwzględnieniem strat doraźnych i częściowych strat reologicznych);

- **faza użytkowa „2”**: ciężar własny konstrukcji; ciężar własny elementów wyposażenia; sprężenie (trwała siła sprężająca – po uwzględnieniu strat doraźnych i strat reologicznych po 100 latach); obciążenia ruchome; osiadanie podpór; oddziaływania termiczne; oddziaływania wiatru.

Zakres prac projektowych dźwigara obejmował: dobór materiałów konstrukcyjnych; zestawienie obciążeń i oddziaływań; wyznaczenie sił wewnętrznych; obliczenie charakterystyk geometrycznych przekroju; zaprojektowanie sprężenia (sił sprężających, tras cięgien i strat sił sprężających); obliczenie końcowych charakterystyk geometrycznych przekroju; zaprojektowanie zbrojenia; weryfikację stanów granicznych SLS i ULS oraz ugięcia. W przypadku płyty pomostu, poprzecznic i wsporników zakres obliczeń obejmował: dobór materiałów konstrukcyjnych; zestawienie obciążeń i oddziaływań; wyznaczenie sił wewnętrznych; zaprojektowanie zbrojenia; weryfikację stanów granicznych SLS i ULS oraz weryfikację ugięć. Raport z wykonanych analiz statyczno-wytrzymałościowych zawiera praca [5]. Zużycie najważniejszych materiałów jednego pomostu było następujące: beton konstrukcyjny ustroju nośnego (C50/60) – 1660 m³; stal zbrojeniowa (A-IIIIN) – 240 t; stal sprężająca (Y1860, 27L15,7) – 78121 kg; zakotwienia czynne kabli sprężających – 48 szt.; łożysko garnkowe stałe (nośność 9000 kN) – 1 szt.; łożyska garnkowe jednokierunkowo przesuwne (nośność 4000 kN) – 2 szt.; łożyska garnkowe jednokierunkowo przesuwne (nośność 12000 kN) – 2 szt.; łożyska garnkowe wielokierunkowo przesuwne (nośność 5000 kN) – 4 szt.; jednomodułowe urządzenia dylatacyjne (nominalny przesuw 80 mm) – 36,48 m.

Analiza porównawcza projektu wyjściowego i zamiennego

W tabeli 2 zestawiono wskaźniki techniczno-ekonomiczne zużycia materiałów konstrukcyjnych projektu wyjściowego (P.W.) i projektu zamiennego (P.Z.). W celu porównania reakcji na posadowienie dokonano oszacowania masy konstrukcji i elementów wyposażenia projektu wyjściowego oraz jego rozkładu na łożyskach. W projekcie wyjściowym na każdej podporze są po dwa łożyska pod jednym pomostem, a w projekcie zamiennym odpowiednio po 3 łożyska. Analiza projektu zamiennego wykazała, że proporcja rozkładu masy całkowitej na podpory P1: P2: P3 wynosi odpowied-

Table 2. Comparison of technical and economic indicators of span structures [5]

Tabela 2. Porównanie wskaźników techniczno-ekonomicznych konstrukcji przęseł [5]

Comparison of technical and economic indicators/Porównanie wskaźników techniczno-ekonomicznych			
Item/Wyszczególnienie		O.D./P.W.	R.D./P.Z.
Usable area of one superstructure [m ²]/Pole powierzchni użytkowej jednego ustroju nośnego [m ²]		1566	1556
Consumption of materials/Zużycie materiałów:			
1.	Concrete per 1 m ² p.u. [m ³ /m ²]/Beton na 1 m ² p.u. [m ³ /m ²]	0,88	1,07
2.	Internal prestressing steel per 1 m ² of usable area [kg/m ²]/Stal sprężająca wewnętrzna na 1 m ² p.u. [kg/m ²]	45,42	50,21
3.	External prestressing steel per 1 m ² of usable area [kg/m ²]/Stal sprężająca zewnętrzna na 1 m ² p.u. [kg/m ²]	16,43	0,00
4.	Structural steel per 1 m ² of usable area [kg/m ²]/Stal konstrukcyjna na 1 m ² p.u. [kg/m ²]	117,26	0,00
5.	Reinforcement steel per 1 m ² of usable area [kg/m ²]/Stal zbrojeniowa na 1 m ² p.u. [kg/m ²]	275,00	154,00
6.	Reinforcement steel per 1 m ² of concrete [kg/m ³]/Stal zbrojeniowa na 1 m ³ betonu [kg/m ³]	312,00	145,00

Markings/Oznaczenia: /p.u. – usable area/powierzchnia użytkowa; O.D. – original design/P.W. – projekt wyjściowy; R.D. – replacement design/P.Z. – projekt zamienny

on the supports P1: P2: P3 was: 0.225: 0.550: 0.225, respectively. Based on this and while taking into account the nature of the longitudinal cross-section of the original facility (pylons above the intermediate support), it was assumed that the proportion of the mass distribution of the original object was approximately: 0.190: 0.620: 0.190. The approximate responses at supports P1, P2 and P3, which are presented in Table 3, can be determined on the basis of the estimation

Analysis of the main construction works, required to construct the superstructures of both facilities [5, 6], led to determination of the existence of sixteen types of tasks in the original design and eleven types of tasks in the alternative design. The data from publications on the topic and the materials provided by one of the companies were analyzed in order to compare the costs of bearings. The costs of the selected bearings (prices from the first quarter of 2024) that are presented in Table 4 are similar in both cases.

The construction of ex-d type structures requires much more complicated design analyses which combine the interworking of two systems of internal and external prestressing. In the case of diagonal and wide bridges a lot of attention must be paid when designing the connection of the extreme crossbeams, having concreted steel sections, with main girders and the anchorages of internal tendons arranged at the beam front. Compared to popular types of two-span, medium-span structures, the ex-d structures are a rarely chosen solution. They require use of a larger number of dedicated structural elements, such as saddle deviators, resistance blocks, formwork pipes which are used for leading the external prestressing tendons out of the girders, external tendons with anti-corrosion protection and casing pipes, which increases the costs of construction. Post-tensioned structures are a very often chosen structure and many construction companies have extensive experience in their implementation. Construction is relatively easy, and the wide availability of specialist companies implementing technological projects and prestressing structures contributes to additional simplification of the process for the contractor.

Table 3. Summary of support reactions [5, 6]

Tabela 3. Zestawienie reakcji podporowych [5, 6]

Sum of characteristic vertical support reactions [kN]/Suma reakcji charakterystycznych pionowych na podporę [kN]			Difference [%] Zmiana [%]
support no./podpora	design/obiekt		
	O.D./P.W.	R.D./P.Z.	
P1	7 467	10 592	+41,9
P2	24 366	26 246	+7,7
P3	7 467	10 594	+41,9
Suma	39 300	47 432	+20,7

Markings/Oznaczenia: O.D. – original design/P.W. – projekt wyjściowy; R.D. – replacement design/P.Z. – projekt zamienny

nio: 0,225: 0,550: 0,225. Na tej podstawie, uwzględniając charakter przekroju podłużnego obiektu wyjściowego (pylony nad podporą pośrednią), przyjęto, że proporcja rozkładu masy obiektu wyjściowego to w przybliżeniu: 0,190: 0,620: 0,190. Oszacowanie umożliwia określenie przybliżonych reakcji na podporach P1, P2 i P3 przedstawionych w tabeli 3.

Analizując główne roboty budowlane, niezbędne do wykonania ustrojów nośnych obu typów konstrukcji

[5, 6], stwierdzono występowanie szesnastu typów robót w projekcie wyjściowym i jedenastu typów robót w projekcie zamiennym. W celu porównania kosztów łożysk analizowano dane literaturowe i materiały udostępnione przez jedną z firm. Zestawione w tabeli 4 koszty dobranych łożysk (ceny z I kwartału 2024 r.), w obydwu przypadkach są zbliżone.

Wykonanie konstrukcji typu ex-d wymaga znacznie bardziej skomplikowanych analiz projektowych łączących współpracę dwóch systemów sprężenia wewnętrznego i zewnętrznego. Zaprojektowanie połączenia poprzecznic skrajnych, z obetonowanymi kształtownikami stalowymi, z dźwigarami głównymi, z rozmieszczonymi na czole belek zakotwieniami cięgien wewnętrznych, w ukośnych i szerokich pomostach wymaga również sporo uwagi. W porównaniu z popularnymi typami konstrukcji dwuprzęsłowych, średniej rozpiętości, konstrukcje typu ex-d są rzadko wybieranym rozwiązaniem. Wymagają stosowania większej liczby specjalistycznych elementów konstrukcji, takich jak: dewiatory siodłowe; bloki oporowe; rury szalunkowe do wyprowadzenia zewnętrznych kabli sprężających z dźwigarów; kable zewnętrzne wraz z zabezpieczeniem antykorozyjnym i rurami osłonowymi, a to w efekcie zwiększa koszty wykonawstwa. Obiekty kablobetonowe są bardzo często wybieraną konstrukcją i wiele firm budowlanych ma duże doświadczenie w ich realizacji. Wykonawstwo jest stosunkowo łatwe, a duża dostępność specjalistycznych firm realizujących projekty technologiczne i sprężanie konstrukcji stanowi dodatkowe uproszczenie procesu dla wykonawcy.

Table 4. Comparison of bearing cost [5]

Tabela 4. Porównanie kosztu łożysk [5]

Design/ Projekt	Qty. [pcs./ Liczba [szt.]	Bearing type/ Typ łożyska	Characteristic values/ Wartości charakterystyczne			Calculated values/ Wartości obliczeniowe			Shift/Przesuw		Rotation/ Obrót [rad]	Price ¹⁾ /Cena ¹⁾	
			V _{max} [kN]	V _{min} [kN]	H _{max} [kN]	V _{max} [kN]	V _{min} [kN]	H _{max} [kN]	L [mm]	T [mm]		[PLN per unit]/ [zł/szt.]	[PLN]/[zł]
Original/ Wyjściowy	1	S	21000	10500	1500	26000	9450	2025	0	0	0,01	31 658	31 658
	2	W	5500	2750	165	7000	2475	210	100	20	0,01	7 776	15 552
	1	W	21000	10500	630	26000	9450	780	20	20	0,01	29 909	29 909
	2	J	5500	2750	400	7000	2475	540	100	0	0,01	10 449	20 898
Repla- cement/ Zamienny	1	S	8543	4324	155	12071	3445	382	0	0	0,01	10 935	10 935
	2	W	4665	3065	140	6204	2827	186	100	20	0,01	7 047	14 094
	2	W	4875	3186	146	6279	2986	188	100	20	0,01	7 290	14 580
	2	J	3804	1788	155	4924	1339	248	100	0	0,01	6 561	13 122
	2	J	10258	5129	841	14200	8039	1208	0	20	0,01	24 192	48 384
Price of bearings for the original design/Cena łożysk Projektu Wyjściowego												98 017	
Price of bearings for the replacement design/Cena łożysk Projektu Zamiennego												101 115	

¹⁾ Unit prices (Q1 2024) offered by the supplier of bearings for the original design/Ceny jednostkowe (I kwartał 2024 r.) od dostawcy łożysk do projektu wyjściowego
Bearing types/Oznaczenia typu łożysk: F – fixed bearing/S – stałe; M – multidirectional sliding bearings/W – wielokierunkowo przesuwne; S – singledirectional sliding bearings/J – jednokierunkowo przesuwne

Summary and conclusions

Based on the data collected, the following conclusions were drawn:

■ **supports and foundations** – the structure of the span in the alternative design requires changes to the structure of the abutments and of the intermediate support. The adoption of three, instead of two, bearings on each of the bridge deck supports necessitates changes primarily to the intermediate support – e.g. three-column supports topped with a cap should be designed for each carriageway. When adjusting the abutments, the bearing bench should be lowered and the area behind the ends of the superstructures should be redesigned to allow access to the anchoring areas (space for servicing). In order to increase the load-bearing capacity of the body, pilasters under each of the girders or ribs can be used for stiffening the body from the backfill side;

■ **the superstructure of the alternative design** constitutes 120% of the mass of the supporting structure of the original design, and the element which is the most disadvantageous is the increase by approx. 42% of the total vertical reaction at each abutment. This calls for increasing the load-bearing capacity of the foundation, e.g. by adding new piles and widening the foundation strips. The load-bearing capacity of the intermediate support foundation is sufficient (an increase in the load on the bearings by approx. 8%) but the structure of the columns requires reconstruction due to the different arrangement of the bearings and their different spacing (three bearings instead of two);

■ **material consumption** – Table 5 shows the consumption of construction materials for both compared structures along with their unit prices (Q1 2024). The replacement design uses 9.86% more internal prestressing steel, but in relation to the total consumption of prestressing steel (internal and external), the amount used is by 24% smaller. The consumption of

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie zestawionych danych sformułowano następujące wnioski:

■ **podpory i posadowienie** – konstrukcja przęsła projektu zamiennego wymaga zmiany konstrukcji przyczółków i podpory pośredniej. Przyjęcie trzech zamiast dwóch rzędów łożysk na każdej z podpór pomostu powoduje konieczność zmiany przede wszystkim podpory pośredniej – np. pod każdą jezdnię należy zaprojektować podpory trzysłupowe zwieńczone oczepem. Dostosowując przyczółki, należy obniżyć ławę podłożyskową i przeprojektować strefę za końcami ustrojów nośnych, tak aby umożliwić dostęp do stref zakotwień (przestrzeń do obsługi). W celu zwiększenia nośności korpusu można zastosować pilastry pod każdym z dźwigarów lub żebra usztywniające korpus od strony zapylki;

■ **konstrukcja nośna projektu zamiennego** stanowi 120% masy konstrukcji nośnej projektu wyjściowego, a najbardziej niekorzystne jest zwiększenie o ok. 42% łącznej reakcji pionowej na każdym przyczółku. Powoduje to konieczność zwiększenia nośności posadowienia, np. przez dodanie nowych pali i poszerzenie ław fundamentowych. Nośność posadowienia podpory pośredniej jest wystarczająca (wzrost obciążenia na łożyska o ok. 8%), ale konstrukcja słupów wymaga przebudowy ze względu na inne rozmieszczenie łożysk oraz inny ich rozstaw (trzy łożyska zamiast dwóch);

■ **zużycie materiałów** – w tabeli 5 zestawiono zużycie materiałów konstrukcyjnych obu porównywanych konstrukcji wraz z ich cenami jednostkowymi (I kwartał 2024 r.). W projekcie zamiennym zastosowano o 9,86% więcej stali sprężającej wewnętrznej, ale w odniesieniu do sumarycznego zużycia stali sprężającej (wewnętrznej i zewnętrznej) jest to o 24% mniej. Zużycie stali zbrojeniowej obiektu ka-

Table 5. Quantitative and cost comparison of the consumption of span and bearing construction materials [5]

Tabela 5. Porównanie ilościowe i kosztowe zużycia materiałów konstrukcji przęseł i łożysk [5]

Material/Materiał	Quantity of consumption of materials/ Ilościowe zużycie materiałów				Difference/ Różnica	Unit price ¹⁾ / Cena jednostkowa ¹⁾	Price [PLN '000s]/ Cena [tys. zł]	
	class/type/ klasa/gatunek	unit/ jedn.	O.D./ P.W.	R.D./ P.Z.			O.D./P.W.	R.D./P.Z.
Internal pre-stressing cables (ipc)/ Kable sprężające wewnętrzne (ksw)	Y1860	kg	71 110	78 121	+9,86%	26,88 PLN/zł	1 911,44	2 099,89
External pre-stressing cables (epc)/ Kable sprężające zewnętrzne (ksz)	Y1860	kg	25 729	0	-100,00%	49,00 PLN/zł	1 260,72	0,00
Structural steel/Stal konstrukcyjna	18G2A	kg	163 150	0	-100,00%	18,87 PLN/zł	3 078,64	0,00
Reinforcement steel/Stal zbrojeniowa	A-IIIIN	kg	431 000	240 000	-44,32%	9,20 PLN/zł	3 965,20	2 208,00
Structural concrete/Beton konstrukcyjny	C50/60	m ³	1346	1660	+23,33%	1 367,04 PLN/zł	1 840,04	2 269,29
Self-compacting structural concrete/ Beton konstrukcyjny samozagęszczalny	C50/60	m ³	34	0	-100,00%	1 367,04 PLN/zł	46,48	0,00
Active anchors (ipc)/Zakotwienia czynne (ksw)	–	unit/ szt.	48	48	0,00%	(included in the price of prestressing tendons)/ (ujęte w cenie ksw)		
Active anchors (epc)/Zakotwienia czynne (ksz)	–	unit/szt.	12	0	-100,00%	(included in the price of prestressing tendons)/ (ujęte w cenie ksw)		
HDPE pipes with filler (anticorrosion protection) eps/Rury HDPE z wypełnieniem (zabezpieczeniem antykorozyjnym) ksz	–	m	135	0	-100,00%			
Saddle deviators/Dewiatory siodłowe	S355	kg	1 850	0	-100,00%			
Formwork pipes/Rury szalunkowe	18G2A	kg	18 600	0	-100,00%	18,87 PLN/zł	350,98	0,00
Single-module expansion joint devices with 80 mm nomi- nal displacement/Dylatacje jednomodułowe o przesuwie nom. 80 mm	–	m	36,3	36,48	+0,50%	4 000,00 PLN/zł	145,20	145,92
Pot bearings (F)/Łożyska garmkowe (S)	–	unit/szt	1	1	0,00%	(total price on the basis of Table 4)/ (cena łączna na podstawie tabeli 4)	98,02	101,12
Pot bearings (S)/Łożyska garmkowe (J)	–	unit/szt	2	4	+100,00%			
Pot bearings (M)/Łożyska garmkowe (W)	–	unit/szt	3	4	+33,33%			
						Total/Łącznie:	12 696,71	6824,21
						Difference/Różnica:		-5872,50 (-46,25%)

Legend/Oznaczenia: O.D. (R.D.) – respectively the original and the replacement design/P.W. (P.Z.) – odpowiednio projekt wyjściowy i zamienny; ipc – internal pre-stressing tendons/ksw – kable sprężające wewnętrzne; epc – external pre-stressing tendons/ksk – kable sprężające zewnętrzne; F – fixed/S – stałe; S – singledirectional sliding/J – jednokierunkowo (M – multidirectional sliding/W – wielokierunkowo) przesuwne;

¹⁾ Unit prices: Q1 2024 (based on the settlement prices from large infrastructural contract implemented in Warsaw)/Ceny jednostkowe: I kwartał 2024 r. (na podstawie cen rozliczeniowych dużego kontraktu infrastrukturalnego realizowanego w Warszawie)

reinforcing steel of the post-tensioned concrete structure is by 44.32% lower, and the total consumption of structural concrete is by 20.29% higher. The ex-d structure used a total of 183.6t of structural steel, which is not present in the post-tensioned concrete structure. Taking into account other materials, such as self-compacting concrete, anchors and casing pipes of the ex-d tendons, which are not included in the post-tensioned concrete structure, it can be stated that the costs of building a post-tensioned concrete superstructure are significantly lower compared to the ex-d structure (without taking into account the supports). This conclusion is confirmed by Table 5 which contains unit and total prices of construction materials;

■ **cost estimate** – the valuation of the superstructures of the original and replacement design facilities amounts to (Table 5) PLN 12,696,712.50 and PLN 6,824,213.90, respectively, i.e. the costs of the materials of the replacement superstructure amount to approximately 54% of the corresponding costs of the original structure. Analyzing the cost breakdown by individual items, it can be concluded that structural steel significantly increases the costs of the structure (PLN 3,430,000, 27% of the total price of the superstructure of the original design). A more complete picture of the costs of both

blobetonowego jest o 44,32% mniejsze, a łączne zużycie betonu konstrukcyjnego o 20,29% większe. W konstrukcji ex-d zastosowano łącznie 183,6t stali konstrukcyjnej, która w konstrukcji kablobetonowej nie występuje. Biorąc pod uwagę pozostałe materiały, takie jak: beton samozagęszczalny, zakotwienia i rury osłonowe cięgien ex-d, których nie zawiera konstrukcja kablobetonowa, można stwierdzić znaczne obniżenie kosztów wybudowania kablobetonowej konstrukcji nośnej w porównaniu z konstrukcją ex-d (bez uwzględniania podpór). Wniosek ten potwierdza tabela 5 zawierająca ceny jednostkowe i całkowite materiałów konstrukcyjnych;

■ **oszacowanie kosztów** – wycena konstrukcji nośnych obiektów projektu wyjściowego i zamiennego wynosi odpowiednio (tabela 5): 12 696 712,50 zł i 6 824 213,90 zł, czyli koszty materiałów zamiennnej konstrukcji nośnej stanowią ok. 54% kosztów konstrukcji wyjściowej. Analizując zestawienie kosztów poszczególnych pozycji, można stwierdzić, że stal konstrukcyjna znacznie zwiększa koszty konstrukcji (3 430 000 zł, 27% ceny całkowitej ustroju nośnego projektu wyjściowego). Do pełniejszego obrazu kosztów obu konstrukcji należałoby uwzględnić również koszty pozostałych

structures should also include the costs of other distinguishing elements (foundations, supports and equipment), as well as the elements which are present in both structures in similar quantities, such as: pavement, insulation or curbs. From the analyses conducted in [5], regarding the differences in the foundation and required changes to the supports, it can be concluded that the difference between the total costs of building both structures will decrease. The costs of the foundation and superstructure in the alternative design would be higher than those of the original design.

Our assessment and the comparative analysis of the costs of constructing the superstructures of the extradosed and post-tensioned concrete beam structures demonstrate that the superstructures in the alternative design are a more economical solution, easier to implement and maintain. The analyzed structures were designed according to different systems of standards, but would be burdened with the same utility (motorway) traffic. However, the existing extradosed structure has a fundamental advantage in terms of aesthetics and stands out from other typical structures on the Poznań-Warsaw section of the A2 motorway.

As part of further work, if there is such interest, additional analyses are planned that will take into account "other aspects" of the theoretical replacement of superstructures, and above all: modification of supports and foundations; costs of maintaining the existing and replacement structure, or the technology of demolition of existing structures while maintaining traffic continuity on the A1 and A2 motorways. Due to unavailability of precise data on the foundations and the costs of demolition as well as the cost of changing the traffic organization, it was concluded that the remaining aspects would distort the conclusions regarding the load-bearing structures of the flyovers. *This paper was co-financed under the research grant of the Warsaw University of Technology supporting the scientific activity in the discipline of Civil Engineering, Geodesy and Transport.*

Received: 20.01.2025 r.
Revised: 10.03.2025 r.
Published: 23.07.2025 r.

odróżniających się elementów (posadowienia podpór i wyposażenia), oraz elementów, które występują w obu konstrukcjach w zbliżonych ilościach, jak: nawierzchnia, izolacje czy krawężniki. Z analiz przeprowadzonych w pracy [5] dotyczących różnic w posadowieniu oraz wymaganych zmian podpór można wnioskować, że różnica między całkowitymi kosztami wybudowania obu obiektów zmniejszy się. Koszty posadowienia i konstrukcji podpór projektu zamiennego byłyby większe niż projektu wyjściowego.

Z naszej oceny i przeprowadzonej analizy porównawczej kosztów wykonania ustrojów nośnych konstrukcji extradosed i kablobetonowej belkowej wynika, że konstrukcja nośna projektu zamiennego jest rozwiązaniem bardziej ekonomicznym, łatwiejszym w realizacji i utrzymaniu. Analizowane konstrukcje zaprojektowane zostały wg różnych systemów norm, ale byłyby obciążone tym samym ruchem użytkowym (autostradowym). Istniejąca konstrukcja extradosed ma jednak zasadniczą przewagę pod względem estetycznym i wyróżnia się na tle innych typowych obiektów na odcinku autostrady A2 Poznań – Warszawa.

W ramach dalszych prac, o ile będzie takie zainteresowanie, przewidziano dodatkowe analizy, które uwzględnią „pozostałe aspekty” teoretycznej wymiany konstrukcji nośnej, a przede wszystkim: modyfikację podpór i posadowienia; koszty utrzymania konstrukcji istniejącej i zamiennnej czy technologię rozbiórki istniejącej konstrukcji wraz z utrzymaniem ciągłości ruchu na autostradach A1 i A2. Ze względu na niedostępność dokładnych danych dotyczących posadowienia oraz kosztów wyburzenia i zmiany organizacji ruchu, stwierdzono, że pozostałe aspekty zaburzyłyby wnioski dotyczące konstrukcji nośnych wiaduktów.

Publikacja była finansowana w ramach grantu badawczego Politechniki Warszawskiej wspierającego prowadzenie działalności naukowej w dyscyplinie Inżynieria, Geodezja i Transport.

Artykuł wpłynął do redakcji: 20.01.2025 r.
Otrzymało poprawiny po recenzjach: 10.03.2025 r.
Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] Łagoda G. Wiadukty nad autostradami. Wybrane zagadnienia kształtowania konstrukcyjnego i estetycznego. Prace Naukowe PW. Budownictwo. 2001; vol. 137. Warszawa, Oficyna Wyd. PW, 197 s., ISBN ISSN 0137-2297.
- [2] Mossakowski P, Trochymiak W. Specyfika kablobetonowych, dwuprzęsłowych, drogowych obiektów mostowych. Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Sprężone, Kraków, 18-20 kwietnia 2018, Politechnika Krakowska 2018, s. 151, ISBN 978-83-941947-2-7.
- [3] Biliszczuk J, Onysyk J, Barcik W, Toczkievicz R, Tukendorf A. Extradosed bridges in Poland – design and construction. *Frontiers in Built Environment*. 2017. DOI: 10.3389/fbuil.2016.00037.
- [4] Trochymiak W. Mosty betonowe z naprężanymi cięgnami – ewolucja form konstrukcyjnych i zasad obliczania. Prace Naukowe. Budownictwo, z. 154. Oficyna Wyd. PW, Warszawa 2012, s. 354, ISSN 0137-2297.
- [5] Wierzbowski M. Analiza faz budowy i stanów użytkowych autostradowego wiaduktu z betonu sprężonego. Dyplomowa Praca Magisterska. Politechnika Warszawska, Warszawa 2024, s. 180.
- [6] Trochymiak W, Mossakowski P, Wasilewski K, Bucholc K, Bielski W, Wierzbowski M. Ekspertyza techniczna poprzecznic podporowych nad przyczółkami wiaduktu WA244P na Węzle Łódź-Płn. w ciągu jezdni prawej autostrady A1 w km 293.728, nad autostradą A2, wraz z opracowaniem PFU naprawy. Politechnika Warszawska, IDiM, marzec 2020.

- [7] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. *Dziennik Ustaw* Nr 63 poz. 735 z 3.08.2000 r.
- [8] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. *Dziennik Ustaw* Nr 43 poz. 430 z 2.03.1999 r.
- [9] PN-85/S-10030. Obiekty mostowe. Obciążenia.
- [10] PN-91/S-10042. Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone.
- [11] PN-82/S-10052. Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Projektowanie.
- [12] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych (Dz.U. z 2021 r. poz. 2351 oraz z 2022 r. poz. 88).
- [13] Knauff M. Obliczanie konstrukcji żelbetonowych według Eurokodu 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.
- [14] Siwowski T. Projektowanie mostów według Eurokodów, Elamed Media Group, 2016.
- [15] Małaj A, Wołowicki W. Projektowanie mostów betonowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010, ISBN 978-83-206-1766-5.
- [16] Praca zbiorowa. Podstawy projektowania konstrukcji żelbetonowych i sprężonych wg Eurokodu 2. Sekcja Konstrukcji Betonowych KILiW PAN, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006, ISBN 83-7125-136-X.