

dr inż. Jacek Szymanowski^{1*)}

ORCID: 0000-0002-8154-8726

mgr inż. Maciej Marut²⁾

ORCID: 0009-0009-6239-2672

A parametric approach to the design of a ferry quay in Norway

Podejście parametryczne w projektowaniu nabrzeża promowego w Norwegii

DOI: 10.15199/33.2025.12.16

Abstract. The aim of the article is to present a case study on the application of parametric modeling to the design of a ferry quay in Norway using modern digital tools. This method, applied in this case, allowed for the optimization of the pile foundation layout and the analysis of the structural load-bearing capacity based on geotechnical data. The obtained results show that parametric modeling enhances the efficiency of the design process, enabling quick modifications and the optimization of desired structural parameters, including the improvement of its stability.

Keywords: parametric modeling; ferry quay; pile foundations; BIM

Streszczenie. W artykule przedstawiono studium przypadku dotyczącego zastosowania modelowania parametrycznego, z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi cyfrowych, w projektowaniu nabrzeża promowego w Norwegii. Wykorzystana w tym przypadku metoda pozwoliła na optymalizację układu fundamentów palowych oraz analizę nośności konstrukcji na podstawie danych geotechnicznych. Uzyskane wyniki pokazują, że modelowanie parametryczne zwiększa efektywność procesu projektowego, umożliwiając szybką modyfikację oraz zoptymalizowanie pożądanych parametrów konstrukcji, w tym poprawę jej stateczności.

Słowa kluczowe: modelowanie parametryczne; nabrzeże promowe; fundamenty palowe; BIM

Maritime transport plays a key role in Norway's transportation system – the country boasts an extensive coastline with numerous fjords and islands, making ferry connections an essential element of its transport infrastructure. According to publicly available data, Norway has approximately 150 permanent ferry connections, and ferry piers are an integral part of the public road network – the total number of bridges and ferry crossings on national and regional roads reaches nearly 20,000 [1]. Many of these structures were built decades ago and now require modernization due to technical (wear, corrosion) and operational (increased traffic, larger ferries) reasons (Photo 1).

An additional factor necessitating the modernization of ferry infrastructure is the ecological transformation. Norway is consistently introducing low- and zero-emission ferries. New ferry types often require quay adaptations by installing charging equipment and changing mooring systems, which further justifies the need to modernize ferry ports [2]. Modernization of ferry ports in Norway is therefore necessary due to both aging structures and technological changes, as well as growing expectations regarding safety and capacity. Designing such facilities presents an engineering challenge – in addition to bearing the loads typical of bridge structures (vehicle traffic, dead weight), the port must also withstand specific marine conditions. These include horizontal forces caused by ship mooring and side impacts, loads from waves and sea currents, and an aggressive environment (corrosive

Transport morski odgrywa kluczową rolę w systemie komunikacyjnym Norwegii, która dysponuje rozległą linią brzegową z licznymi fiordami i wyspami, co sprawia, że połączenia promowe są niezbędnym elementem infrastruktury transportowej. Z ogólnodostępnych danych wynika, że w Norwegii funkcjonuje ok. 150 stałych połączeń promowych, a nabrzeża promowe stanowią integralną część sieci dróg publicznych – łączna liczba mostów i przepraw promowych na drogach krajowych i wojewódzkich wynosi niemal 20 tys. [1]. Wiele z tych konstrukcji zostało wybudowanych dekady temu i obecnie wymaga modernizacji ze względów technicznych (zużycie, korozja) oraz eksploatacyjnych (zwiększony ruch, większe jednostki promowe) (fotografia 1). Dodatkowym czynnikiem wymuszającym unowocześnienie infrastruktury promowej jest transformacja ekologiczna. Norwegia konsekwentnie wprowadza promy nisko- i zeroemisyjne, co wymaga dostosowania nabrzeży przez instalację urządzeń do ładowania i zmianę układów cumowniczych [2]. Przeprowadzenie modernizacji jest zatem konieczne zarówno z powodu starzenia się konstrukcji, jak i zmian technologicznych oraz rosnących oczekiwań dotyczących bezpieczeństwa i przepustowości. Projektowanie takich obiektów stanowi wyzwanie inżynierskie – oprócz przenoszenia obciążeń typowych w przypadku konstrukcji mostowych (ruch pojazdów, ciężar własny), nabrzeże musi być odporne na specyficzne czynniki morskie, do których należą m.in.: oddziaływania poziome wywołane cumowaniem statków i uderzeniami burtowymi; obciążenia od fal i prądów morskich; a także środowisko agresywne (woda morska powodująca korozję) [3]. Tradycyjny proces projektowania konstrukcji hydrotechnicznych o tak złożonych wymaga-

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ COWI A/S

^{*)} Correspondence address: jacek.szymanowski@pwr.edu.pl



Photo 1. Ferry quay in Norway: a) ramp and pier; b) damage and wear of the infrastructure requiring modernization
Fot. 1. Nabrzeże promowe w Norwegii: a) rampa i pomost; b) uszkodzenia i zużycie infrastruktury wymagającej modernizacji

seawater) [3]. The traditional design process for hydraulic structures with such complex requirements can be time-consuming, requiring iterative analyses of multiple load scenarios and close coordination between the structural and geotechnical engineering disciplines. With the increasing complexity of engineering projects, design methods utilizing advanced digital modeling and integrated computational models are becoming increasingly important. This article presents the application of parametric modeling to a ferry pier project in Norway, streamlining the design and analysis process. The aim is to present a developed methodology integrating the geometric model of the structure with FEM analysis and a BIM model, as well as to discuss the calculation results for a pile-supported structure, taking into account its interaction with the subsoil. The article compares the obtained results and experiences with the parametric approach to traditional design methods, pointing out the benefits and potential limitations of implementing this technology in maritime infrastructure design. The key questions concern whether parametric modeling enables effective design iteration and optimization of the quay structure, and how the integration of the 3D model with load-bearing capacity analysis (including geotechnical analysis) affects the efficiency of the design process.

Methodology

The methodology utilizes a parametric modeling approach, which involves creating a digital model of the structure defined by a set of input parameters. These parameters describe the key geometric and material characteristics of the ferry pier – including the pier dimensions (length, width, slab thickness), pile spacing and diameter, pile lengths (foundation depth), foundation level, and the arrangement of equipment elements (fenders, ramp guides, etc.). Instead of manually drawing the geometry for each design iteration, the parametric model automatically generates it based on defined relationships and variables and allows for quick modifications. Changing the value of any parameter (e.g., increasing the pile spacing or the thickness of the pier slab) automatically updates the geometry of the entire structure. This allows for multiple “what-if” analyses to be conducted in a short time, significantly streamlining the process of finding the optimal solution.

niach bywa czasochłonny i wymaga iteracyjnych analiz wielu scenariuszy obciążeń oraz ścisłej koordynacji między branżą konstrukcyjną i geotechniczną. Wobec rosnącej złożoności projektów inżynierskich coraz większego znaczenia nabierają metody projektowania wykorzystujące zaawansowane modelowanie cyfrowe i zintegrowane modele obliczeniowe.

W artykule przedstawiono zastosowanie modelowania parametrycznego do projektowania nabrzeża promowego w Norwegii, jako elementu usprawniającego ten proces i analizy. Zaprezentowano opracowaną metodykę integrującą model geometryczny konstrukcji z analizą MES i modelem BIM, a także wyniki obliczeń konstrukcji posadowionej na palach z uwzględnieniem współpracy z podłożem gruntowym. Porównano uzyskane efekty z tradycyjnymi metodami projektowania, wskazując na korzyści i potencjalne ograniczenia wdrożenia tej technologii w projektowaniu infrastruktury morskiej. Najważniejsze pytania dotyczą tego, czy modelowanie parametryczne umożliwia skuteczną iterację projektu i optymalizację konstrukcji nabrzeża oraz w jaki sposób integracja modelu 3D z analizą nośności (w tym geotechniczną) wpływa na efektywność procesu projektowego.

Metodyka

Zastosowano podejście bazujące na modelowaniu parametrycznym, które polega na opracowaniu cyfrowego modelu konstrukcji zdefiniowanego za pomocą parametrów wejściowych, opisujących kluczowe cechy geometryczne i materiałowe nabrzeża promowego, m.in.: wymiary pomostu (długość, szerokość, grubość płyty); rozstaw i średnicę pali oraz ich długości (głębokość posadowienia); poziom posadowienia względem wody; rozmieszczenie elementów wyposażenia (odbojnice, prowadnice rampy itp.). Zamiast ręcznie kreślić geometrię obiektu w przypadku każdej iteracji projektu, model parametryczny generuje ją automatycznie na podstawie zdefiniowanych zależności i zmiennych oraz pozwala na szybką modyfikację. Zmiana wartości dowolnego parametru, np. zwiększenie rozstawu pali czy grubości płyty pomostu, skutkuje automatyczną aktualizacją geometrii konstrukcji. W efekcie możliwe jest przeprowadzenie wielu analiz „co, jeśli” w krótkim czasie, co znacznie usprawnia poszukiwanie optymalnego rozwiązania.

Rhinoceros 3D software with the Grasshopper plug-in [4] was used to develop the parametric model. Grasshopper enables graphical programming of geometric relationships, and an algorithm was used to generate a 3D model of the quay. This model defined, among other things, lines representing the pile axes, the shape and dimensions of the pier, and the outlines of the fender devices. A key element was linking the model to design and calculation tools. Bi-directional Grasshopper links were used with Tekla Structures [5] and SOFiSTiK [6], as shown in the design data flow diagram above (Figure 1). Tekla Structures was used to represent the structural model in a BIM (Building Information Modeling) environment, while SOFiSTiK was used to perform

Do realizacji modelu parametrycznego wykorzystano oprogramowanie Rhino 3D z wtyczką Grasshopper [4], umożliwiającą graficzne programowanie zależności geometrycznych. Za jego pomocą zbudowano algorytm generujący model 3D nabrzeża. W modelu tym zdefiniowano m.in. linie reprezentujące osie pali, kształt i wymiary pomostu, a także zarysy urządzeń odbojowych. Istotnym elementem było powiązanie modelu z narzędziami projektowymi i obliczeniowymi. Wykorzystano dwukierunkowe łącza Grasshopper z programami Tekla Structures [5] oraz SOFiSTiK [6], co przedstawia schemat przepływu danych projektowych pokazany na rysunku 1. Tekla Structures posłużyła do odwzorowania modelu konstrukcji w środowisku BIM (Buil-

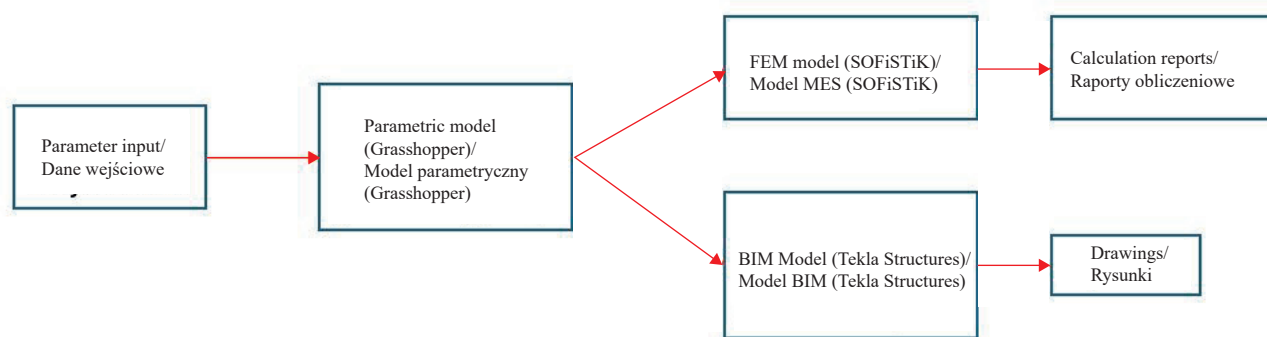


Fig. 1. Schematic diagram of design data flow – integration of the parametric model with BIM and MES systems

Rys. 1. Schemat przepływu danych projektowych – integracja modelu parametrycznego z systemami BIM oraz MES

finite element calculations (FEM). Grasshopper was integrated with Tekla Structures via Tekla Live Link – a dedicated set of Grasshopper components that enables the creation and modification of Tekla objects in real time [7]. In other words, the parametric model generated native Tekla elements (beams, slabs, piles, reinforcement, etc.) directly from Grasshopper. This solution enabled the automatic transfer of generated geometry to the BIM model. For example, the pile axes and their intersection points with the ground level generated in Grasshopper were converted into Tekla „pile” objects with defined steel cross-sections. Similarly, the deck surface was transferred as a reinforced concrete slab. Tekla Structures was then used to add structural details, such as reinforced concrete slab reinforcement, connections to steel elements (mooring devices), additional reinforcements, and anchors. The Grasshopper–Tekla integration ensured geometry consistency during the conceptual and detail modeling stages, minimizing the risk of discrepancies between the calculation model and the production model.

In parallel, the Grasshopper environment was used to build an FEM computational model of the structure. Using the SOFiSTiK Grasshopper Toolkit, appropriate analytical properties were assigned to the generated geometric elements: cross-section profiles (for steel piles – diameter and wall thickness, for the pier – concrete slab thickness), material characteristics of steel and concrete, connections between elements, and support conditions, using the same source data defining the geometric model. The computational model of the quay structure also included pile support in the subsoil, in this case as a pinned support on rocky ground. The prepared model, along with the assigned loads, was

ding Information Modeling), zaś SOFiSTiK do przeprowadzenia obliczeń metodą elementów skończonych (MES). Grasshopper został zintegrowany z Tekla Structures, przez Tekla Live Link, dedykowany zestaw komponentów Grasshopper, który umożliwia tworzenie i modyfikację obiektów Tekla w czasie rzeczywistym [7]. Model parametryczny generował natywne elementy Tekla (belki, płyty, pale, zbrojenie itp.) bezpośrednio z poziomu Grasshoppera. Zastosowanie tego rozwiązania pozwoliło na automatyczne przeniesienie wygenerowanej geometrii do modelu BIM. Przykładowo, wygenerowane w Grasshopperze osie pali i punkty ich przecięcia z poziomem terenu zostały zamienione na obiekty Tekla typu „pile” o zadanych przekrojach stalowych. Analogicznie przeniesiono powierzchnię pomostu jako płytę żelbetową. Tekla Structures posłużyła następnie do dodania detali konstrukcyjnych, takich jak zbrojenie płyty żelbetowej, połączenia z elementami stalowymi (urządzenia cumownicze), dodatkowe wzmocnienia czy kotwy. Integracja Grasshopper–Tekla zapewniła spójność geometrii na etapie modelowania koncepcyjnego i detalicznego, minimalizując ryzyko rozbieżności między modelem obliczeniowym a modelem wykonawczym. Jednocześnie wykorzystano środowisko Grasshoppera do zbudowania modelu obliczeniowego MES konstrukcji. Za pomocą narzędzia SOFiSTiK Grasshopper Toolkit przypisano generowanym elementom geometrycznym odpowiednie właściwości analityczne: profile przekrojów (w przypadku pali stalowych – średnica i grubość ścianki, dla pomostu – grubość płyty betonowej); charakterystyki materiałowe stali i betonu; połączenia między elementami oraz warunki podporowe, wykorzystując te same dane źródłowe definiujące model geometryczny. Model

automatically exported to the SOFiSTiK program as a batch file, where the actual static calculations were performed.

Due to the integration of Grasshopper and SOFiSTiK, it was possible to conduct finite element analyses without the need to manually recreate the geometry in the calculation program – the entire model definition was transferred directly from the parametric script. This enabled immediate assessment of the impact of model changes (e.g., pile extensions, changes in support spacing, or load modifications) on the structural calculation results. The pile lengths were selected based on calculations that took into account geotechnical conditions and the bathymetric terrain surface imported into Grasshopper in IFC format.

The model was exported in an open IFC format, enabling it to be shared with project stakeholders – the investor, road authorities, and designers from supporting disciplines (including geotechnical and electrical). This provided all parties with consistent, three-dimensional information instead of just two-dimensional drawings, significantly improving communication and detecting interdisciplinary conflicts early in the project. Furthermore, the use of a BIM model ensures easier management of the facility in the future – the model can serve as a digital twin of the structure during its operation, facilitating planning for potential renovations and expansions.

Discussion of results

The structure of the ferry quay under consideration consists of a steel-concrete pier and pile foundations embedded in the rocky seabed [8]. The pier is a reinforced concrete slab with a longitudinal span adapted to local conditions – on the order of several dozen meters, allowing the ferry to berth freely – and a width sufficient for two-way traffic, typically 6–8 m, allowing for simultaneous entry and exit of vehicles. The slab, constructed in accordance with the NS-EN 1992-1-1 standard [9] using C35/45 concrete, was designed to evenly distribute loads and maintain permissible deformations, in accordance with the guidelines of Norwegian design manuals [10]. In critical areas where foundations are located, the slab thickness was increased from 500 mm to 1100 mm, which allows for better load transfer to the supporting elements and reduces the risk of local displacements.

The quay foundations consist of Ø610 mm steel piles with a 16 mm wall, filled with concrete, driven into contact with solid rock, and mechanically embedded. Once the required depth is reached, a drilling is performed, into which a steel dowel or core is placed; the lower section of the pile is filled with high-strength concrete with reinforcement. For significant tensile forces, Ø75 mm Dywidag rock anchors are also used, embedded in drilled holes to a depth of 7–13 m and filled with cement grout. This solution allows for the transfer of both vertical and horizontal loads and provides pullout resistance, in accordance with Norwegian design standards. In static models, pile foundations embedded in solid rock are treated as pinned, meaning the pile base transfers only axial forces, without bending moments. This approach eliminates the need for spring models (e.g., Winkler springs), which are typical for pile foundations in less stiff soils. This simplified FEM model faithfully

obliczeniowy konstrukcji nabrzeża uwzględnił posadowienie pali w podłożu gruntowym, w tym przypadku jako przegubowe na podłożu skalistym. Tak przygotowany model wraz z przypisanymi obciążeniami został automatycznie wyeksportowany do programu SOFiSTiK w postaci pliku wsadowego, gdzie wykonano właściwe obliczenia statyczne.

Dzięki integracji oprogramowania Grasshopper i SOFiSTiK możliwe było przeprowadzenie analiz metodą elementów skończonych bez konieczności ręcznego odtwarzania geometrii w programie obliczeniowym – definicja modelu była przekazywana bezpośrednio ze skryptu parametrycznego. Umożliwiło to natychmiastową ocenę wpływu zmian w modelu (np. wydłużenia pali, zmiany rozstawu podpór czy modyfikacji obciążeń) na wyniki obliczeń konstrukcji. Długość pali dobierano na podstawie obliczeń uwzględniających warunki geotechniczne oraz powierzchni batymetrycznej terenu w formacie IFC importowanej do Grasshoppera.

Model został wyeksportowany w otwartym formacie IFC, co umożliwiło udostępnienie go interesariuszom projektu – inwestorowi, administracji drogowej oraz projektantom branż towarzyszących (m.in. geotechnicznej i elektrycznej). Dzięki temu wszystkie strony dysponowały jednolitą, trójwymiarową informacją zamiast jedynie dwuwymiarowych rysunków, co znacznie usprawniło komunikację oraz wykrywanie kolizji międzybranżowych na wczesnym etapie projektu. Ponadto, zastosowanie modelu BIM zapewnia łatwiejsze zarządzanie obiektem w przyszłości – model może posłużyć jako cyfrowy bliźniak konstrukcji podczas jej eksploatacji, ułatwiając planowanie ewentualnych remontów i rozbudów.

Omówienie wyników

Rozpatrywane nabrzeże promowe składa się z pomostu oraz fundamentów palowych osadzonych w skalistym dnie morskim – rysunek 2 [8]. Pomost stanowiła płyta żelbetowa o rozpiętości wzdłużnej dobranej do lokalnych warunków – rzędu kilkunastu metrów, co umożliwia swobodne dobieganie promu oraz o szerokości 6–8 m zapewniającej dwukierunkowy ruch pojazdów. Płyta, wykonana zgodnie z normą NS-EN 1992-1-1 [9] z betonu klasy C35/45, została zaprojektowana w taki sposób, aby równomiernie rozkładać obciążenia oraz utrzymywać dopuszczalne odkształcenie, zgodnie z wytycznymi norweskich podręczników projektowych [10]. W krytycznych rejonach, gdzie lokalizowane są fundamenty, grubość płyty została zwiększona z 500 mm do 1100 mm. Pozwala to na przeniesienie obciążeń na elementy podporowe oraz redukuje ryzyko lokalnych przemieszczeń.

Fundamenty nabrzeża stanowią pale stalowe o średnicy Ø610 mm i grubości ścianki 16 mm, wypełnione betonem, wbijane na głębokość skały litej i osadzone w niej mechanicznie. Po osiągnięciu wymaganej głębokości wykonuje się przewiert, w którym umieszcza się dybel stalowy lub rdzeń; dolny odcinek pala wypełnia się betonem wysokowytrzymałościowym ze zbrojeniem. W przypadku znacznych sił rozciągających stosuje się również kotwy skalne Dywidag Ø75 mm, osadzone w przewierconych otworach na głębokość 7–13 m i wypełniane zaprawą cementową. Rozwiązanie to umożliwia przenoszenie zarówno

reproduces the actual operating conditions of the structure. This type of foundation solution allows for reliable transfer of loads from the pier to the bedrock, which is a crucial element of the safety and durability of the entire quay structure.

Further down the structure, fender devices, i.e., modern elastomeric fenders [11], were attached to the front of the deck slab. The figure below shows a top and side view, illustrating the slab geometry, the location of the foundations, and the position of the fender system on the edge of the structure (Figure 2).

Actions and loads analysis. A full set of load combinations resulting from NS-EN standards was considered, including permanent loads, variable operational loads, and environmental actions. Permanent loads include the dead weight of the structure and loads resulting from equipment – barriers, ramps, and mooring devices – which are arranged according to Norwegian guidelines. Variable loads result mainly from vehicle and passenger traffic on the pier and from live loads corresponding to the maximum number of vehicles on the slab. The analysis also

obejmuje pionowych, jak i horyzontalnych, a także zapewnia odporność na wrywanie, zgodnie z norweskimi normami projektowymi. W modelach statycznych fundamenty palowe osadzone w skale litej traktuje się jako podparte przegubowo, tzn. baza pała przekazuje wyłącznie siły osiowe, bez momentów zginających. Takie podejście eliminuje potrzebę stosowania modeli sprężyn (np. Winklera), które stosuje się w przypadku fundamentów palowych w gruntach o niewielkiej sztywności. Dzięki temu uproszczony model MES wiernie odwzorowuje rzeczywiste warunki pracy konstrukcji. Tego rodzaju rozwiązania fundamentowe pozwalają na niezawodne przenoszenie obciążeń z pomostu na podłoże skalne, co stanowi istotny element bezpieczeństwa oraz trwałości całej konstrukcji nabrzeża. Do czoła płyty pomostu zamocowano nowoczesne odbojnice elastomerowe [11] – rysunek 2.

Analiza obciążeń i oddziaływań. Rozpatrzono pełen zestaw kombinacji obciążeń wynikających z norm NS-EN [12], w tym obciążenia stałe, zmienne eksploatacyjne oraz oddziaływania środowiskowe. Obciążenia stałe obejmują ciężar własny kon-

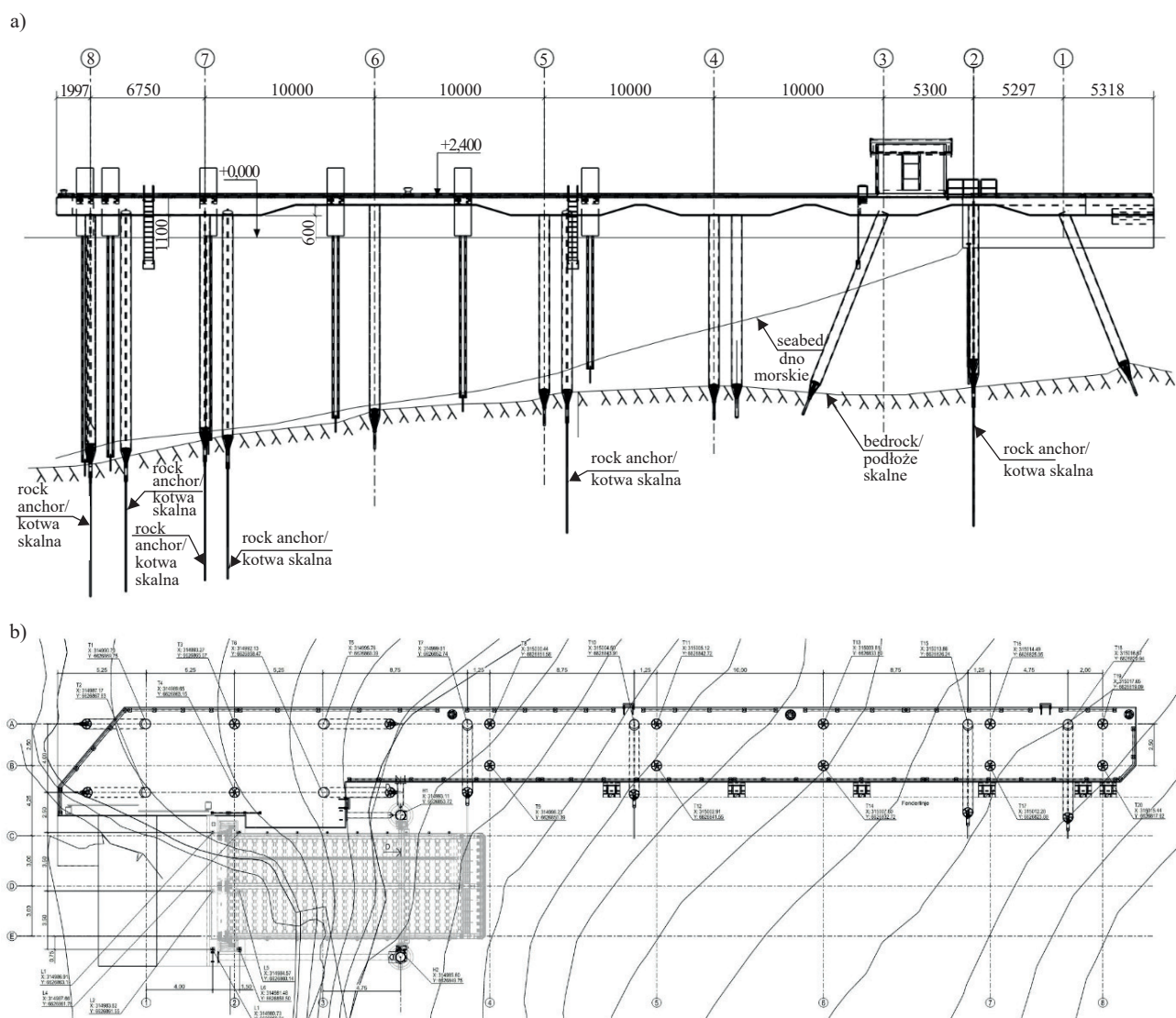


Fig. 2. Ferry quay in Norway: a) side view; b) top view

Rys. 2. Nabrzeże promowe w Norwegii: a) widok z boku; b) widok z góry

included environmental actions, such as wind action and wave pressure on the structure. A key aspect was considering dynamic loads generated by the impact of a mooring ferry, where a scenario of emergency ferry docking at a speed causing the maximum force on the fenders was assumed. Using a method based on kinetic energy, it was determined that the ferry's energy – calculated based on its mass and speed – is absorbed by the elastomeric fenders, reducing the force transmitted to the structure to values not exceeding approximately 1.5 MN. Additionally, vehicle traffic loads were considered in two ways: as uniformly distributed vertical loads (4.32 kN/m^2) and as a horizontal point load (345 kN). FEM analyses showed that at peak dynamic force values, the piles undergo horizontal deflection in the order of 5–8 cm, and bending moments at the base reach values of approximately 800–900 kNm, which, with a section moment capacity exceeding 1200 kNm, guarantees a sufficient safety margin.

Soil conditions. Soil conditions along the new quay were determined based on detailed geotechnical investigations and visual inspection of the terrain, in accordance with reports prepared by Norwegian institutions. The occurrence of soil layers over rock is characterized by significant variability – along the quay, the layer thickness ranges from 0.3 m to 6 m, while in regions where the quay transitions to land, the layer thickness can reach 6–8.5 m. In further areas, rock occurs directly at the surface, which significantly increases foundation stability. Geological surveys showed that the topsoil layer consists of sandy sediments with an admixture of organic fractions and silty clay; in one of the samples, clay humidity was measured at a level of approximately 32%. Parameters adopted for design include soil unit weight γ equal to 19 kN/m^3 , friction angle ϕ' equal to 30° , and cohesion c' at a level of 2 kPa. Due to the limited thickness of the soil layer over the rock, its influence on pile bearing capacity was considered marginal, allowing for direct seating of foundations in the rocky substrate. Additionally, detailed geological analysis indicates that the dominant rock type is mica schist, characterized by a compressive strength of approximately 50 MPa and cohesion estimated at 0.5 MPa. These data form the basis for the selection of design parameters, as confirmed by the geological map (Figure 3) and illustrated by the site photograph (Photo 2).

Parametric model and verification of results. The parametric model, developed using Grasshopper software, enables the automatic generation of the computational model in the SOFiS-TiK system and the geometric BIM model in Tekla Structures (Fig. 4). Additionally, thanks to the terrain topography model, pile lengths and positioning were adapted to actual ground conditions. The model assumed pinned connections between the hanging wall and the pier slab, and between the piles and the slab. The parametric model also enables variant analyses, such as modifying the number of piles, changing their arrangement, or simulating the reduction of ferry kinetic energy by using a lighter mooring unit.

The iterative analyses performed allowed for significant optimization of the quay's structural system. Due to the automatic update of the layout and pile lengths, faster and more precise adaptation to changes in terrain geometry and load conditions was possible, which translated into tangible material and time savings. A comparison of basic indicators for projects realized

strukcji i ładunki wynikające z wyposażenia: bariery, rampy oraz urządzenia cumownicze, które są rozmieszczane zgodnie z wytycznymi norweskimi. Obciążenia zmienne wynikają głównie z ruchu pojazdów i pasażerów na pomoście oraz z obciążenia użytkowego odpowiadającego maksymalnej liczbie pojazdów znajdujących się na płycie. W analizie uwzględniono również oddziaływania środowiskowe, takie jak działanie wiatru i parcie fal na konstrukcję. Kluczowym aspektem było uwzględnienie obciążeń dynamicznych, generowanych przez uderzenie cumowanego promu, gdzie przyjęto scenariusz awaryjnego przybicia promu z prędkością, która powoduje zadziałanie maksymalnej siły na odbojnice. Metodą bazującą na energii kinetycznej określono, że energia promu – wyliczona na podstawie jego masy i prędkości – jest absorbowana przez odbojnice elastomerowe, redukując przekazywaną na konstrukcję siłę do wartości nieprzekraczających ok. 1,5 MN [11]. Dodatkowo, obciążenia ruchem pojazdów rozpatrywano dwutorowo: jako równomiernie rozłożone wertykalne ($4,32 \text{ kN/m}^2$) oraz jako horyzontalne punktowe (345 kN) [13]. Analizy metodą elementów skończonych wykazały, że przy szczytowej wartości siły dynamicznej pale ulegają ugięciu poziomemu 5–8 cm, a moment zginający przy podstawie osiąga wartość ok. 800–900 kNm, ale przy momencie nośnym przekroju przekraczającym 1200 kNm zagwarantowany jest wystarczający margines bezpieczeństwa.

Warunki gruntowe wzdłuż nowego nabrzeża zostały określone na podstawie szczegółowych badań geotechnicznych oraz wizualnej inspekcji terenu, zgodnie z raportami sporządzonymi przez instytucje norweskie [8]. Występowanie warstw gruntu nad skałą charakteryzuje się znaczną zmiennością – wzdłuż nabrzeża grubość warstwy wynosi $0,3 \text{ m} \div 6 \text{ m}$, natomiast w rejonach, gdzie nabrzeże przechodzi na ląd, grubość warstwy może sięgać 6–8,5 m. W dalszych obszarach skała występuje bezpośrednio na powierzchni, co znacznie zwiększa stabilność fundamentów. Badania geologiczne wykazały, że wierzchnią warstwę gruntu tworzą piaszczyste osady z domieszką frakcji organicznych oraz glina pylasta; zmierzono wilgotność gliny na poziomie ok. 32%. Parametry przyjęte do projektowania obejmują ciężar objętościowy gruntu $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, kąt tarcia $\phi' = 30^\circ$ oraz spójność $c' = 2 \text{ kPa}$ [14]. Ze względu na ograniczoną miąższość warstwy gruntu nad skałą, jej wpływ na nośność pali został uznany za marginalny, co umożliwia bezpośrednie osadzenie fundamentów w podłożu skalistym. Dodatkowo, szczegółowa analiza geologiczna wskazuje, że dominującym rodzajem skały jest łupek mikowy, charakteryzujący się wytrzymałością na ściskanie ok. 50 MPa oraz spójnością 0,5 MPa. Dane te stanowią podstawę do doboru parametrów projektowych, co potwierdza mapa geologiczna (rysunek 3) [15] oraz widok terenu (fotografia 2).

Model parametryczny, opracowany przy użyciu programu Grasshopper, umożliwia automatyczne generowanie modelu obliczeniowego w systemie SOFiS-TiK oraz modelu geometrycznego BIM w Tekla Structures (rysunek 4). Dodatkowo, dzięki modelowi topografii terenu dostosowano długość i rozmieszczenie pali do rzeczywistych warunków gruntowych [16]. W modelu przyjęto przegubowe połączenia między ścianą wiszącą a płytą pomostu oraz między palami a płytą. Model parametryczny umożliwia przeprowadzenie analiz wariantowych,

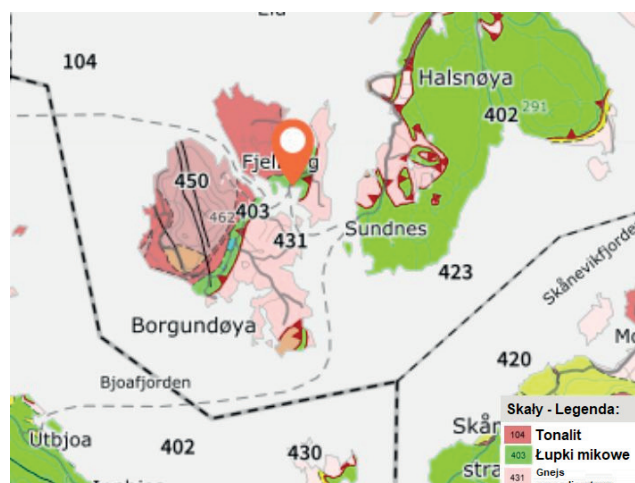


Fig. 3. Ferry wharf in Norway – geological map [15]
Rys. 3. Nabrzeże promowe w Norwegii – mapa geologiczna [15]

traditionally and via the parametric optimization method is presented in the table 1. The design also foresees detailed solutions regarding pile reinforcement – in accordance with Norwegian guidelines, longitudinal bars Ø25 mm and stirrups Ø12 mm spaced every 100 mm are used, resulting in a reinforcement ratio of approximately 3.2%. The calculation results, verified using the FAGUS software, confirm that force values, bending moments, and deflections fall within the accepted limits of load-bearing capacity and serviceability. FAGUS enables analysis of reinforced and prestressed concrete sections for load-bearing capacity and stiffness, in accordance with the adopted design standard, taking into account actual reinforcement arrangement and non-linear material properties.

Verification of load-bearing capacity and serviceability states of quay elements (piles, slab) was conducted in accordance with Eurocode principles, based on FEM analysis results. The following conditions were checked:

- **Ultimate Limit State (ULS):** Design values of forces and moments acting on the structural element were compared with the design capacity of the given element, according to relationship (1):

$$M_{Fd} \leq M_{Rd} \wedge N_{Fd} \leq N_{Rd} \quad (1)$$

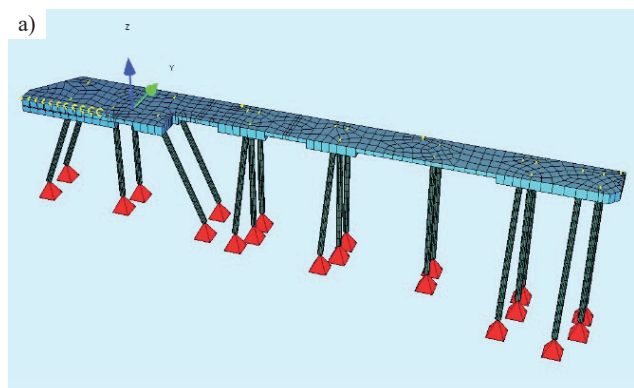


Photo 2. Ferry quay area [15]
Fot. 2. Teren nabrzeża promowego

takich jak modyfikacja liczby pali, zmiana ich rozmieszczenia czy symulacja redukcji energii kinetycznej promu przez zastosowanie lżejszej jednostki cumowniczej.

Przeprowadzone iteracyjne analizy pozwoliły znacznie zoptymalizować układ konstrukcyjny nabrzeża. Dzięki automatycznej aktualizacji układu oraz długości pali możliwa była szybsza i bardziej precyzyjna adaptacja do zmian geometrii terenu i warunków obciążenia, co przełożyło się na wymierne oszczędności materiałowe i czasowe. Porównanie podstawowych wskaźników w przypadku projektów realizowanych metodą tradycyjną oraz metodą optymalizacji parametrycznej przedstawiono w tabeli 1. Projekt przewiduje również szczegółowe rozwiązania dotyczące zbrojenia pali. Zgodnie z wytycznymi norweskimi stosuje się pręty podłużne Ø25 mm oraz strzemiona Ø12 mm rozmieszczone co 100 mm, co daje stopień zbrojenia ok. 3,2%. Wyniki obliczeń, weryfikowane za pomocą programu FAGUS [17], potwierdzają, że wartości sił, momentów zginających oraz ugięć mieszczą się w przyjętych granicach nośności i użyteczności. FAGUS umożliwia analizę przekrojów żelbetowych i sprężonych pod kątem nośności oraz sztywności, zgodnie z przyjętą normą projektową,

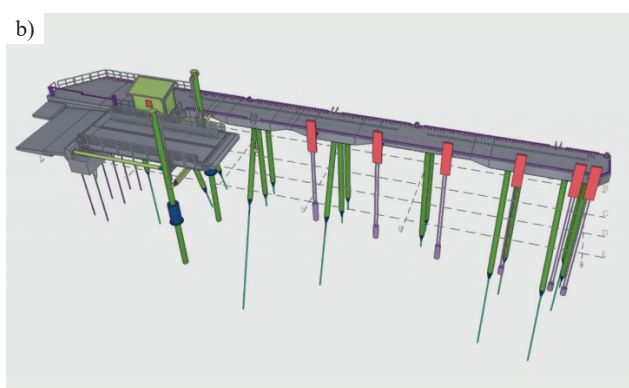


Fig. 4. Ferry quay in Norway: a) computational model; b) geometric model
Rys. 4. Nabrzeże promowe w Norwegii: a) model obliczeniowy; b) model geometryczny

Table 1. Comparison of traditional and parametric approaches to infrastructure design

Tabela 1. Porównanie tradycyjnego i parametrycznego podejścia do projektowania infrastruktury

Parameter/Parametr	Traditional project (based on twin structures)/ Projekt tradycyjny (na podstawie konstrukcji bliźniaczych)	Parametric project (case study)/ Projekt parametryczny (case study)
Number of piles/ Liczba pali [szt]	20	18
Concrete usage [m ³]/ Zużycie betonu [m ³]	344.3	302.42
Steel mass [t]/ Masa stali [t]	69.47	50.52
Design time [h]/ Czas projektowania [h]	400	300

• **Serviceability Limit State (SLS):** Structural deflections were checked, requiring that the maximum displacement value not exceed the permissible one, according to standard recommendations (2):

$$\delta_{\max} \leq \delta_{\text{accept}} \quad (2)$$

• Permissible deflection values are usually determined based on Eurocode guidelines – typically they constitute the quotient of the span divided by 250 or 300.

Discussion

The presented results confirm that the application of parametric modeling, integrated with BIM and FEM systems, significantly enhance the infrastructure design process. Automation enables rapid generation and analysis of many structural variants, allowing for instant modifications – changes in geometry, arrangement of load-bearing elements, or load schemes are immediately reflected in the entire model. Thanks to this, the risk of errors is reduced, and documentation remains consistent, as one common model serves both for FEM analyses and for creating the BIM model. This integration facilitates interdisciplinary coordination and detection of potential collisions at an early design stage. Table 2 presents a comparison of the traditional design approach with the parametric method. The parametric method is characterized by a shorter concept development time and the possibility of conducting numerous optimization iterations. In the traditional approach, changes require manual modeling of each version of the project, which is time-consuming and increases the risk of errors, whereas in the parametric method, changing a single parameter automatically updates the entire model, enabling a quick check of the impact of this modification on the structural design.

Despite numerous advantages, this method is not free from limitations. Preparation of an advanced parametric model requires specialized knowledge and experience in operating tools such as Grasshopper, which may constitute a barrier for teams accustomed to traditional design methods. The initial workload related to developing modeling rules is significant, and main-

uwzględniając rzeczywiste rozmieszczenie zbrojenia i nieliniowe właściwości materiałów.

Weryfikacja nośności i stanów użyteczności elementów nabrzeża (pali, płyty) była prowadzona zgodnie z Eurokodami, na podstawie wyników analizy MES. Sprawdzano:

• **stan graniczny nośności (SGN)** – projektowe wartości sił i momentów oddziałujących na element konstrukcyjny porównywano z obliczeniową nośnością danego elementu, zgodnie z zależnością (1):

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \wedge N_{Ed} \leq N_{Rd} \quad (1)$$

• **stan graniczny użyteczności (SGU)** – sprawdzano ugięcia konstrukcji, zakładając, by maksymalna wartość przemieszczenia nie przekraczała dopuszczalnej, zgodnie z zaleceniami norm (2):

$$\delta_{\max} \leq \delta_{\text{dopuszczalne}} \quad (2)$$

Wartości dopuszczalne ugięć są zazwyczaj określone na podstawie wytycznych Eurokodu i stanowią one iloraz rozpiętości i liczb 250 lub 300.

Dyskusja

Przedstawione wyniki potwierdzają, że **zastosowanie modelowania parametrycznego, zintegrowanego z systemami BIM i MES, znacznie usprawnia proces projektowania infrastruktury**. Automatyzacja umożliwia szybkie generowanie i analizę wielu wariantów konstrukcyjnych, co pozwala na błyskawiczne wprowadzanie modyfikacji – zmiana geometrii, rozmieszczenia elementów nośnych czy schematu obciążeń jest natychmiast odzwierciedlana w całym modelu. W efekcie ryzyko błędów zostaje zredukowane, a dokumentacja pozostaje spójna, gdyż jeden wspólny model służy zarówno do analiz MES, jak i do tworzenia modelu BIM. Ułatwia to koordynację międzybranżową oraz wykrywanie potencjalnych kolizji już na wczesnym etapie projektowania. Tabela 2 przedstawia porównanie tradycyjnego podejścia do projektowania z metodą parametryczną, która charakteryzuje się krótszym czasem opracowania koncepcji oraz możliwością przeprowadzenia licznych iteracji optymalizacyjnych. W podejściu tradycyjnym wszelkie zmiany wymagają ręcznego modelowania każdej wersji projektu, co jest czasochłonne i zwiększa ryzyko błędów, natomiast w metodzie parametrycznej zmiana jednego parametru automatycznie aktualizuje cały model, umożliwiając szybkie sprawdzenie wpływu tej modyfikacji na projekt konstrukcji. Mimo licznych zalet, metoda ta nie jest wolna od ograniczeń. Przygotowanie zaawansowanego modelu parametrycznego wymaga specjalistycznej wiedzy oraz doświadczenia w obsłudze narzędzi takich jak Grasshopper, co może stanowić barierę dla zespołów przyzwyczajonych do tradycyjnych metod projektowych. Początkowy nakład pracy związany z opracowaniem reguł modelowania jest duży, a utrzymanie oraz modyfikacja rozbudowanego skryptu mogą być trudne, zwłaszcza w przypadku zmian w strukturze projektu. Dodatkowo, integracja z systemami BIM i MES wymaga zapewnienia odpowiedniej mocy obliczeniowej oraz interoperacyjności między platformami, co

Table 2. Comparison of traditional and parametric approaches to infrastructure design – general approach
Tabela 2. Porównanie tradycyjnego i parametrycznego podejścia do projektowania infrastruktury – ujęcie ogólne

Aspect/Aspekt	Traditional approach/ Podejście tradycyjne	Parametric approach/ Podejście parametryczne
Number of analyzed project variants/ Liczba analizowanych wariantów projektu	Limited – manual creation of each version/ ograniczona – ręczne tworzenie każdej wersji	High – automatic generation of models/ duża – automatyczna generacja modeli
Concept development time/ Czas opracowania koncepcji	Long – changes require manual modeling/ długi – zmiany wymagają ręcznego modelowania	Short – immediate model update/ krótki – natychmiastowa aktualizacja modelu
Integration of analysis with model/ Integracja analizy z modelem	Separate stages: modeling and analysis separately/ oddzielne etapy: modelowanie i analiza osobno	Full integration of geometric model with FEM analysis/ pełna integracja modelu geometrycznego z analizą MES
Solution optimization/ Optymalizacja rozwiązań	Limited – dependent on designer's experience/ ograniczona – zależna od doświadczenia projektanta	Automatic optimization using algorithms/ automatyczna optymalizacja przy użyciu algorytmów
Hardware and software requirements/ Wymagania sprzętowe i oprogramowanie	Standard CAD tools/ standardowe narzędzia CAD	Advanced tools (Grasshopper, BIM API) and high computing power/ zaawansowane narzędzia (Grasshopper, BIM API) oraz duża moc obliczeniowa
Required competencies/ Wymagane kompetencje	Classical engineering knowledge, CAD operation/ klasyczna wiedza inżynierska, obsługa CAD	Additionally: parametric programming skills/ dodatkowo: umiejętność programowania parametrycznego

taining or modifying a complex script can be difficult, especially with changes in the project structure. Additionally, integration with BIM and FEM systems requires ensuring high computing power and appropriate interoperability between platforms, which constitutes another technical challenge. In summary, parametric modeling, thanks to the possibility of rapid iteration, automatic optimization, and full data integration, offers significant benefits in infrastructure design. At the same time, to fully utilize the potential of this method, investments in technical competencies and appropriate computational resources are necessary. Despite certain limitations, this method has great potential to refine design processes, which is particularly important in the realization of large, complex infrastructure projects where documentation consistency and iteration efficiency are key to the final success of the undertaking. The described approach (BIM + FEM + parametric optimization) is not isolated. In Poland, it was used during the modernization of the track layout and construction of the Zabłocie–Krzymionki railway flyover in Kraków (2015–2017), where the Tekla model along with FEM calculations allowed for shortening the reinforcement coordination time by approximately 30% [18]. Globally, a reference example is the Randselva Bridge in Norway – the first 634-meter bridge designed and built without traditional drawings, where 70% of elements were generated parametrically in the Grasshopper-Tekla environment, and the entire execution documentation came from the BIM model [19].

Conclusions

The conducted case study indicates that the application of parametric modeling in design brings tangible benefits. The parametric model enables rapid generation and analysis of many structural variants, which significantly shortens the time to develop an optimal design compared to the traditional approach. Automating the process reduces the risk of errors and ensures consistent documen-

stanowi kolejne wyzwanie techniczne. Podsumowując, modelowanie parametryczne, dzięki możliwości szybkiej iteracji, automatycznej optymalizacji oraz pełnej integracji danych, oferuje znaczne korzyści w projektowaniu infrastruktury. Jednocześnie, aby w pełni wykorzystać potencjał tej metody, niezbędne są inwestycje w kompetencje techniczne oraz odpowiednie zasoby obliczeniowe. Mimo pewnych ograniczeń, metoda ta ma duży potencjał usprawnienia procesów projektowych, co jest szczególnie istotne przy realizacji dużych, złożonych projektów infrastrukturalnych, gdzie spójność dokumentacji oraz efektywność iteracji mają kluczowe znaczenie dla końcowego sukcesu przedsięwzięcia.

Opisane podejście (BIM + MES + optymalizacja parametryczna) wykorzystano w Polsce podczas **modernizacji układu torowego i budowy estakady kolejowej Zabłocie–Krzymionki w Krakowie (2015–2017)**, gdzie model Tekla wraz z obliczeniami MES pozwolił skrócić czas koordynacji zbrojenia o ok. 30% [18]. Na świecie referencyjnym przykładem jest **most Randselva Bridge w Norwegii** – pierwszy 634-metrowy most zaprojektowany i zbudowany bez tradycyjnych rysunków, 70% elementów wygenerowano parametrycznie w środowisku Grasshopper-Tekla, a dokumentacja wykonawcza pochodziła z modelu BIM [19].

Wnioski

Przeprowadzone studium przypadku wskazuje, że **zastosowanie modelowania parametrycznego w projektowaniu przynosi wymierne korzyści**. Umożliwia szybkie generowanie i analizę wielu wariantów konstrukcji, co istotnie skraca czas opracowania optymalnego projektu w porównaniu z podejściem tradycyjnym. Automatyzacja procesu redukuje ryzyko błędów oraz zapewnia spójność dokumentacji, a to przekłada się na bardziej efektywny proces projektowy. Zastosowanie tego podejścia w kontekście

tation, resulting in a more efficient design process. Applying this approach to ferry piers allows for rapid model adaptation to new conditions, such as a change in ferry type or increased loads, and allows for the assessment of whether the structure requires additional reinforcement. It also enables the simulation of “what-if” scenarios and supports investment decisions regarding the scope and priorities of modernization. Furthermore, parametric modeling provides greater flexibility, accuracy, and potential for solution optimization, although it requires specialized knowledge and workload during the model preparation phase. In the long term, especially when designing many similar facilities, investing in these techniques translates into higher design quality and significant time savings. The development of parametric component libraries for port infrastructure, such as standardized models of fenders, piles, and equipment components, further streamlines the design process [20]. In summary, the case study demonstrates that a modern design approach based on parametric modeling and the integration of BIM and FEM systems is not only feasible but also desirable in the context of contemporary engineering challenges in both marine and civil engineering. Further implementation and development of parametric methods, as well as intensive training of engineering staff in digital tools that enhance design, such as Grasshopper, Tekla, and SOFiSTiK, contributes to the widespread adoption of integrated work methods, which promotes more efficient and sustainable implementation in the infrastructure sector.

nabrzeży promowych umożliwia szybkie dostosowanie modelu do nowych warunków, takich jak zmiana typu promu czy zwiększenie obciążeń, oraz pozwala na ocenę, czy konstrukcja wymaga dodatkowych wzmocnień. Daje również możliwość symulacji scenariuszy „co-jeśli” i wspiera podejmowanie decyzji inwestycyjnych dotyczących zakresu i priorytetów modernizacji. Ponadto, modelowanie parametryczne zapewnia większą elastyczność, dokładność i potencjał optymalizacji rozwiązań, choć wymaga specjalistycznej wiedzy i nakładu pracy na etapie przygotowania modelu. W długoterminowej perspektywie, szczególnie przy projektowaniu wielu podobnych obiektów, przekłada się to na większą jakość projektów oraz znaczne oszczędności czasu. Rozwój bibliotek komponentów parametrycznych infrastruktury portowej, takich jak standaryzowane modele odbojnic, pali czy elementów wyposażenia, jeszcze bardziej usprawnia proces projektowania [20]. Przeprowadzone studium przypadku wykazało, że nowoczesne podejście do projektowania, oparte na modelowaniu parametrycznym i integracji systemów BIM oraz MES, jest wykonalne i pożądane w kontekście współczesnych wyzwań inżynierii morskiej i lądowej. Dalsze wdrażanie i rozwijanie metod parametrycznych oraz intensywne szkolenie kadr inżynierskich w zakresie narzędzi cyfrowych usprawniających projektowanie, takich jak Grasshopper, Tekla i SOFiSTiK, przyczynia się do upowszechnienia zintegrowanych metod pracy, co sprzyja bardziej efektywnym i trwałym realizacjom w sektorze infrastruktury.

Received: 05.05.2025

Revised: 30.07.2025

Published: 23.12.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 05.05.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.07.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Goad M. „Promy docenione na norweskich znaczkach pocztowych” („Ferries praised on Norwegian stamps”), Linn’s Stamp News, 2023. [Online]. Dostępne: <https://linns.com> [01.03.2025].
- [2] DNV, „Ktoś musi być pierwszy” („Someone has to go first”), DNV Expert Story. [Online]. Dostęp: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Someone-has-to-go-first/>.
- [3] Statens vegvesen, Podręcznik N400 – Projektowanie mostów („Håndbok N400 – Bruprosjektering”), Oslo, Norwegia: Statens vegvesen, 2017.
- [4] Trimble Inc., Tekla Structures 2024 – Get familiar with Tekla Structures. Manual użytkownika, Espoo/Columbus OH, 2024.
- [5] SOFiSTiK AG, User Manual ASE LADE (Manual 306), Norymberga, 2022.
- [6] Robert McNeel & Associates, Grasshopper – Visual Programming for Rhino 3D, User Guide, Seattle, 2020.
- [7] Tekla Structures, „Tekla Live Link dla Grasshoppera” („Tekla Live Link for Grasshopper”), Tekla.com. [Online]. Dostępne: <https://www.tekla.com/solutions/products/tekla-live-link-for-grasshopper> [01.03.2025].
- [8] Statens vegvesen, Raport geotechniczny, Raport 30733-GEOT-1 („Geoteknisk rapport, Rapport 30733-GEOT-1”), Oslo: Statens vegvesen, 22.01.2019.
- [9] Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu – NS-EN 1992-1-1 („Design of concrete structures – NS-EN 1992-1-1”), Bruksela: CEN, 2004.
- [10] Statens vegvesen, Podręcznik V220, Wytrzymałość na ściskanie i adhezja na podstawie danych doświadczalnych („Håndbok V220, Trykfasthet og adhesjon basert på erfaringsdata”), Oslo: Statens vegvesen, 2018.
- [11] Statens vegvesen, N400, Rozdział 4.8.2–4. Wytyczne dotyczące projektowania nabrzeża („N400, Kapittel 4.8.2–4. Retningslinjer for utforming av kai”), Oslo: Statens vegvesen, 2017.
- [12] Eurokod 0, NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA: 2016, Podstawy projektowania konstrukcji („Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner”), Bruksela: CEN, 2016.
- [13] Statens vegvesen, Budowa dróg – Podręcznik N200 („Vegbygging – Håndbok N200”), Oslo: Statens vegvesen, 2022.
- [14] Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne – NS-EN 1997-1:2004+A1+NA („Geoteknisk prosjektering – NS-EN 1997-1:2004+A1+NA”), Bruksela: CEN, 2004.
- [15] NGU, Mapa geologiczna podłoża skalnego („Berggrunn kart”), Oslo: Norges geologiske undersøkelse (NGU), 2020.
- [16] Statens vegvesen, Podręcznik V431, Projektowanie geotechniczne („Håndbok V431, Geoteknisk prosjektering”), Oslo: Statens vegvesen, 2019.
- [17] Cubus AG, FAGUS v9 – Documentation and Verification Examples, Zurich, 2023.
- [18] R. Czubiński, „Zastosowanie modelu BIM w projekcie estakady kolejowej Zabłocie–Krzemionki w Krakowie”, Rynek Infrastruktury, vol. 5, pp. 32–37, 2020.
- [19] Trimble Solutions, „Randselva Bridge – the world’s longest bridge built without drawings”, Notatka projektowa i materiały Tekla Global BIM Awards, 2020.
- [20] Trelleborg Marine and Infrastructure, „Systemy odbijaczy” („Fender Systems”), Trelleborg Group. [Online]. Dostęp: <https://www.trelleborg.com/en/marine-and-infrastructure/products-solutions/fender-systems>.