

PdD Eng Mateusz Rajchel^{1*)}

ORCID: 0000-0003-4930-3443

PdD Eng Maciej Kulpa¹⁾

ORCID: 0000-0002-8550-7382

Shaping of bridge spans from decommissioned wind turbine blades

Kształtowanie przęseł obiektów mostowych z wyeksploatowanych łopat turbin wiatrowych

DOI: 10.15199/33.2025.07.18

Abstract. In the wind energy sector, about 2.5 million tons of composite materials are used, mainly placed in wind turbine blades. The first generation of turbines is just ending its life after about 20 years of operation and is successively replaced with modern turbines. By 2025, about 14 thousand blades will be withdrawn from use, which corresponds to 40 – 60 thousand tons of composite materials. Therefore, numerous research and development works are currently being carried out to develop various methods of recycling decommissioned blades, including those enabling their reuse. The paper presents various concepts of bridge spans, shaped with the use of composite wind turbine blades. In particular, the spans of a footbridge and a road bridge, developed in the Department of Roads and Bridges of the University of Technology.

Keywords: wind turbine blade; FRP composite; bridge span.

According to Global Wind Energy Council (GWEC) the wind energy worldwide has increased more than twenty-fold since 2001 [1]. Almost all of this energy is generated by wind turbines, in which each turbine consists of three composite blades, and its older and most popular generations are made of composites FRP (*Fiber reinforced polymer*) based on glass fibers [2]. Wind turbine blades (WTB) from the early 21st century are approaching the end of their 20-year service life regardless of their technical condition. In addition, many wind farms are equipped with new and more powerful wind turbines, although the current ones have not yet reached their full exploitation period, which is typically 25 years.

Nowadays, composite materials of wind turbine blades are recycled mainly by shredding, and the resulting product is mainly used in the cement industry, in fossil fuel power plants as a replacement for coal or natural gas [3]. Other alternative technologies for reusing composites are also being developed, e.g. mechanical recycling, solvolysis and pyrolysis, but the WindEurope report [4] shows that further research and development work is necessary. One of the most desirable activities is recycling, which involves extending the service life of wind turbine blades while using the highest possible share of unprocessed wind turbine blades in the new product. Therefore, reuse is being considered, including in bridge construction [5].

¹⁾ Rzeszów University of Technology

^{*)} Correspondence address: mrajchel@prz.edu.pl

Streszczenie. W sektorze energetyki wiatrowej jest w użytkowaniu ok. 2,5 mln ton materiałów kompozytowych, zastosowanych głównie w łopatach turbin wiatrowych. Pierwsza generacja turbin kończy swoją żywotność po ok. 20 latach eksploatacji i jest sukcesywnie wymieniana na turbiny nowoczesne. Do końca 2025 r. zostanie wycofanych z użytkowania ok. 14 tys. łopat, co odpowiada 40 – 60 tys. ton materiałów kompozytowych. W związku z tym obecnie prowadzone są prace badawczo-rozwojowe, mające na celu opracowanie różnych metod recyklingu zużytych łopat, w tym umożliwiających ponowne ich wykorzystanie (reuse). W artykule przedstawiono różne koncepcje przęseł obiektów mostowych, ukształtowanych z wykorzystaniem kompozytowych łopat turbin wiatrowych. Opisano przęsła kładki dla pieszych oraz mostu drogowego opracowane w Katedrze Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej.

Słowa kluczowe: łopata turbiny wiatrowej; kompozyt FRP; przęsło mostu.

Od 2001 r. udział energii wiatrowej na całym świecie zwiększył się ponaddwudziestokrotnie [1]. Energia ta jest wytwarzana przez turbiny wiatrowe składające się z trzech łopat kompozytowych FRP (ang. *Fibre reinforced polymer*) na bazie włókien szklanych [2]. Łopaty turbin wiatrowych (WTB) z początku XXI w. zbliżają się do końca swojego dwudziestoletniego okresu użytkowania bez względu na ich stan techniczny. Ponadto farmy wiatrowe są wyposażane w nowe turbiny wiatrowe o większej mocy, mimo że nie osiągnęły jeszcze pełnego okresu eksploatacji, który wynosi 25 lat.

Materiały kompozytowe łopat turbin wiatrowych są poddawane recyklingowi głównie przez rozdrabnianie, a powstały produkt jest wykorzystywany w elektrowniach na paliwa kopalne jako zamiennik węgla lub gazu ziemnego [3]. Opracowywane są inne alternatywne technologie ponownego wykorzystania kompozytów, np. recykling mechaniczny, solwoliza i piroliza, ale z raportu WindEurope [4] wynika, że niezbędne są dalsze prace badawczo-rozwojowe. Do najbardziej wskazanych działań należy recykling polegający na przedłużeniu żywotności łopat turbin wiatrowych przy jednoczesnym wykorzystaniu w nowym produkcie możliwie dużego udziału nieprzetworzonej łopaty turbiny wiatrowej. Rozważane jest też powtórne ich wykorzystanie, m.in. w budownictwie mostowym [5].

In order to obtain greater implementation potential, safety, increased stiffness and load-bearing capacity, and forms allowing for wider use of wind turbine blades in bridge construction, it is proposed to connect them with a concrete bridge slab, thus obtaining hybrid structures of the FRP-concrete composite type [6]. The hybrid structure consists of a fragment of a turbine blade connected to concrete by means of a special type of connection. The full connection of both these elements is intended to ensure their cooperation in transferring loads. The main goal of creating hybrid structures is to combine materials in such a way that each of them is used in a way that optimally uses its best properties, which has been confirmed in research works [6]. The main goal of ongoing research projects at the Rzeszów University of Technology regarding the use of used WTB in bridge construction is to develop, design and test two types of hybrid bridge girders made of fragments of wind turbine blades and unconventional concrete for footbridges and small bridges.

The paper discusses two concepts of hybrid structures for the construction of bridge spans using WTB fragments and unconventional concrete from two types of blades, i.e. LM 29.1 and Vestas V-66. The current results of the work have shown that the proposed solutions are feasible and allow for meeting the load-bearing and serviceability conditions. Additionally, other conceptual, worldwide examples of creating bridge spans from wind turbine blades, along with their implementations, have been presented.

Examples of bridge spans made of wind turbine blades

The first concept of a footbridge using wind turbine blades was developed by the architectural firm Superuse Studios from the Netherlands as part of the research and development project Wild [7]. Another example where the concept designed by student Stijn Speksnijder as part of his master's thesis at Delft University of Technology in 2018 [8]. The third concept, which was designed and implemented, was developed as part of the research and development project Re-Wind [9]. It is a 5.5 m long pedestrian and bicycle footbridge built in January 2022 in Cork (Ireland) over the Dungourney River (Photo 1). It's made of two LM 13.4 wind turbine blades, between which a slab was made on the composite permanent formwork attached to the blades. The structure can be used to build footbridges up to 18 m long [9].

The world's first footbridge using wind turbine blades was designed and implemented in Poland, in autumn 2021, which was created in cooperation between the Department of Roads and Bridges of the Rzeszów University of Technology and the Anmet company [10]. The footbridge has a total width of 4.3 m, a span of 16.4 m and a length of 23 m. The supporting structure consists of two wind turbine blades connected to each other at their ends, a steel grid attached to the blades, and composite boards. The laboratory tests carried out confirmed the validity of this solution [11].

The presented span structures, including those actually built (Photo 1 and 2), assume the use of wind turbine blades as main girders, occurring independently, not bonded to concrete, to which the bridge is connected. The spans most often consist of one or two wind turbine blades positioned vertically or

W celu zwiększenia bezpieczeństwa, sztywności i nośności łopat turbin wiatrowych proponuje się połączenie ich z betonem stanowiącym płytę pomostową i uzyskuje w ten sposób konstrukcje hybrydowe typu kompozyt FRP – beton [6]. Składa się ona z fragmentu łopaty turbiny połączonej z betonem za pomocą specjalnego zespolenia. Sztywne połączenie tych elementów ma na celu zapewnienie ich współpracy przy przenoszeniu obciążeń. Dąży się, aby w optymalnym stopniu wykorzystać najlepsze właściwości materiałów [6]. Głównym celem projektów badawczych realizowanych na Politechnice Rzeszowskiej, dotyczących wykorzystania zużytych WTB w budownictwie mostowym, jest opracowanie, zaprojektowanie i zbadanie dwóch typów hybrydowych dźwigarów mostowych wykonanych z fragmentów łopat turbin wiatrowych i betonu niekonwencjonalnego przeznaczonych do kładek i małych mostów.

W artykule omówiono dwie koncepcje przęseł hybrydowych do budowy obiektów mostowych, z betonu niekonwencjonalnego i fragmentów WTB dwóch typów, tj. LM 29.1 oraz Vestas V-66. Uzyskane wyniki prac pokazały, że proponowane rozwiązania są możliwe do zrealizowania i pozwalają na spełnienie warunków nośności i użytkowości. Dodatkowo przedstawiono inne przykłady kształtowania przęseł z łopat turbin wiatrowych wraz z wdrożeniami.

Przykłady przęseł obiektów mostowych wykonanych z łopat turbin wiatrowych

Pierwsza koncepcja kładki z wykorzystaniem łopat turbin wiatrowych została opracowana w ramach projektu naukowo-badawczego Wild [7], druga przez studenta Stijna Speksnijdera w ramach jego pracy magisterskiej na Delft University of Technology w 2018 r. [8], a trzecia, która doczekała się także realizacji w Cork (Irlandia) nad rzeką Dungourney (fotografia 1) w styczniu 2022 r., w ramach projektu naukowo-badawczego Re-Wind [9]. Wzniesiono kładkę pieszo-rowerową o długości 5,5 m wykonaną z dwóch łopat turbin wiatrowych typu LM 13.4, pomiędzy którymi jest pomost na kompozytowym deskowaniu traconym przymocowanym do śmigieł. Zgodnie z [9] konstrukcja może być stosowana do budowy kładek o długości do 18 m.

W Polsce pierwszą kładkę dla pieszych z wykorzystaniem łopat turbin wiatrowych zaprojektowano i wdrożono jesienią 2021 r. Powstała ona w wyniku współpracy Katedry Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej z firmą Anmet [10]. Kładka ma szerokość całkowitą 4,3 m, rozpiętość 16,4 m i długość 23 m. Konstrukcja nośna składa się z dwóch łopat turbin wiatrowych połączonych ze sobą w piascie oraz pomostu z rusztu stalowego przymocowanego do łopat i desek kompozytowych. Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność tego rozwiązania [11].

Konstrukcje przęseł przedstawione na fotografiach 1 i 2 zakładają wykorzystanie łopat turbin wiatrowych jako dźwigarów głównych. Przęsła składają się najczęściej z jednej lub dwóch łopat turbin wiatrowych ustawionych pionowo lub poziomo, do których zamocowany jest po-



Photo 1. Pedestrian and cycle bridge in Cork (Ireland) [9]

Fot. 1. Kładka pieszo-rowerowa w Cork (Irlandia) [9]



Photo 2. Footbridge in Szprotawa (Poland) [10]

Fot. 2. Kładka dla pieszych w Szprotawie (Polska) [10]

horizontally, to which the bridge is attached. A common feature of the solutions is basically the lack of cooperation in transferring loads between the main girder (WTB) and the deck (each of these elements works independently).

Another conceptual solution developed within the ReWind project [9] is a hybrid span structure, which assumes the use of two cuted parts of wind turbine blades, which are basically only formwork for concrete reinforced with GFRP bars with a span of up to 5 m (Figure 1). Due to the lack of full bonding between the concrete and the WTB, in this solution the load is basically carried by the concrete slab reinforced with GFRP bars. In this solution, a connection between the composite part of the wind turbine blade and the concrete is realised only by adhesion.

New solutions for hybrid spans, in which cooperating fragments of LM and Vestas wind turbine blades and concrete were combined, were developed as part of the Lider grant (No. 0031/L-13/2022) and presented in Figures 2 ÷ 4 and discussed in detail later.

most. Cechą takiego rozwiązania jest brak współpracy w przenoszeniu obciążeń pomiędzy dźwigarem głównym (WTB) a pomostem (każdy z tych elementów pracuje w zasadzie osobno).

Innym rozwiązaniem koncepcyjnym opracowanym w ramach projektu ReWind [9] jest konstrukcja hybrydowa przęsła, która zakłada wykorzystanie dwóch rozciętych fragmentów łopat turbin wiatrowych stanowiących jedynie deskowanie betonu zbrojonego prętami GFRP o rozpiętości do 5 m (rysunek 1). Ze względu na brak pełnego zespolenia pomiędzy betonem a WTB, obciążenie przejmuje płyta betonowa zbrojona prętami GFRP.

Nowe rozwiązania przęseł hybrydowych, w których dokonano połączenia współpracujących ze sobą fragmentów łopat turbin wiatrowych typu LM i Vestas oraz betonu zgodnie z rysunkami 2 ÷ 4, zostały opracowane w ramach grantu Lider (nr 0031/L-13/2022).

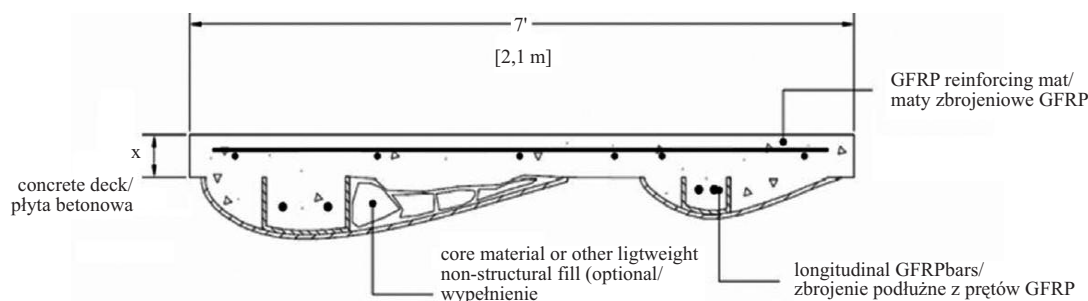


Fig. 1. Hybrid span concept created in ReWind project [9]

Rys. 1. Koncepcja przęsła hybrydowego wg [9]

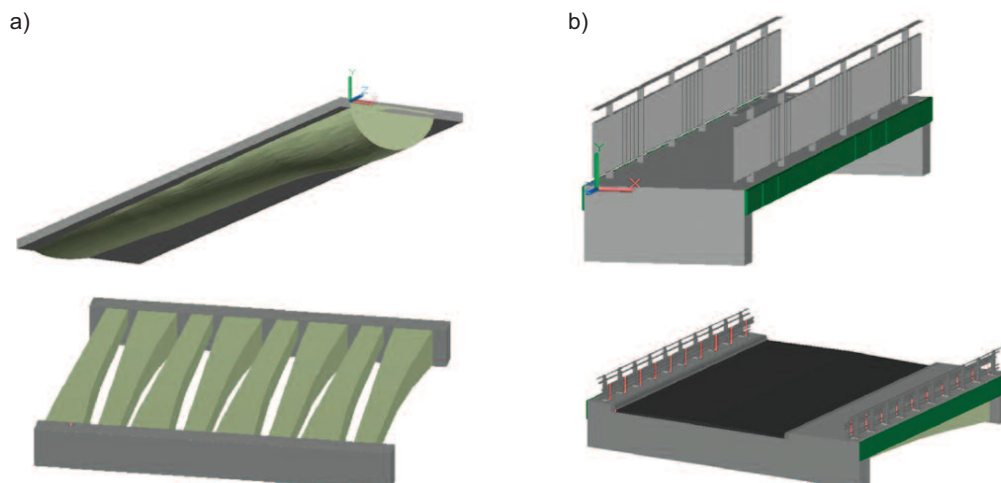


Fig. 2. Visualizations of hybrid spans developed by Road and Bridge Department: a) utilisation of LM; b) Vestas blade V-66
Rys. 2. Wizualizacje przęseł hybrydowych opracowane przez KDiM PRz: a) LM; b) dole Vestas V-66

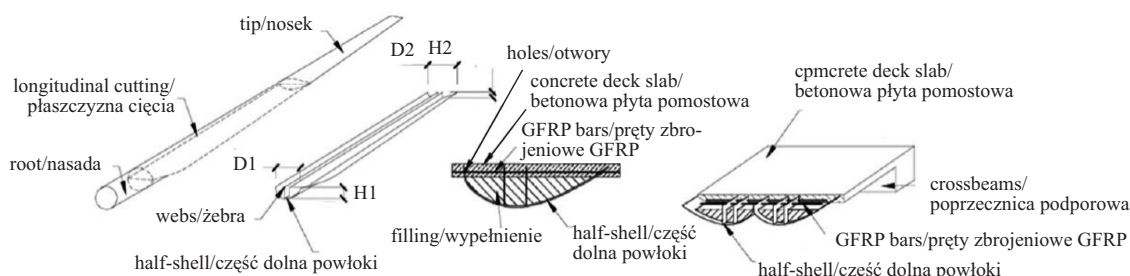


Fig. 3. Concept of a hybrid span made of LM 29.1 type girders
Rys. 3. Koncepcja przęseł hybrydowego z dźwigarów typu LM 29.1

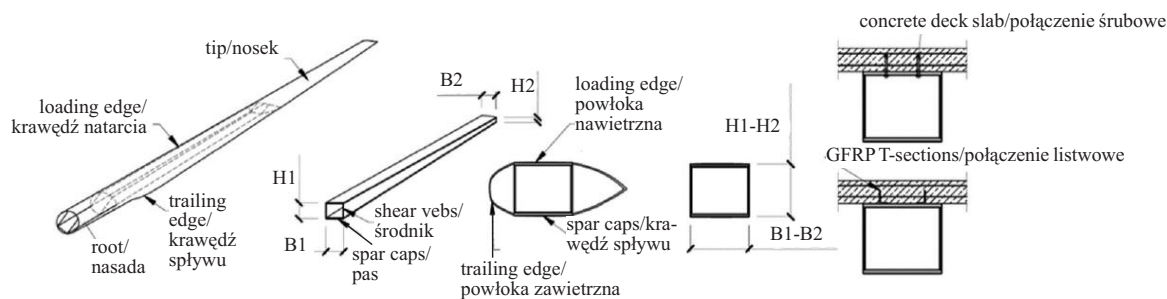


Fig. 4. Concept of a hybrid span made of Vestas V-66 girders
Rys. 4. Koncepcja przęseł hybrydowego z dźwigarów typu Vestas V-66

The concept of a hybrid span made of LM type girders

This concept assumes the use of a section of a wind turbine blade (WTB) type LM 29.1 manufactured by the Danish company LM Wind Power to build footbridge spans that have been withdrawn from service after 20 years. A single WTB type LM 29.1 has a total length of about 30 m and its height ranges from 1120 mm to 2365 mm. The WTB type LM 29.1 is made of E-glass fibres and an epoxy resin matrix. The cross-sections along the WTB have three main elements: the shell, which defines the shape, the girder root, i.e. the main load-bearing element, and the inner webs (Figure 3). The outer shell and webs are made of sandwich composites, while the root and leading edge of the WTB girder are made of solid composites. WTB girders are manufactured by first cutting off the root and nose to obtain the designed beam length, then the remaining

Koncepcja przęseł hybrydowego z dźwigarów typu LM

Koncepcja przedstawiona na rysunku 3 zakłada wykorzystanie fragmentu łopaty turbiny wiatrowej (WTB) typu LM 29.1 do budowy przęseł kładek, która została wycofana z eksploatacji po 20 latach. Pojedyncza WTB typu LM 29.1 ma długość całkowitą ok. 30 m i wysokość 1120 ÷ 2365 mm. Jest wykonana z włókien szklanych typu E oraz matrycy z żywicy epoksydowej. W przekroju poprzecznym WTB są trzy główne elementy: powłoka, która definiuje kształt, nasada dźwigara, czyli główny element nośny i środniki wewnętrzne. Powłoka zewnętrzna i środniki są wykonane z kompozytów warstwowych, natomiast nasada i krawędź natarcia dźwigara z WTB z kompozytów litych. Dźwigary z WTB są wytwarzane w taki sposób, że najpierw odcina się nasadę i nosek, aby uzyskać zaprojektowaną długość belki, a następnie pozosta-

shell is cut longitudinally into two similar parts along the midplane, dividing the WTB into two half-shells. Both parts of the WTB can be used as the main load-bearing elements. A concrete bridge deck slab reinforced with GFRP bars is designed in the upper zone of the hybrid girder. The reinforcement consists of two layers (lower and upper) made of 12 mm diameter transverse bars with a spacing of 7 cm and 10 mm diameter longitudinal bars with a spacing of 10 cm. The transverse bars from the lower grid pass through previously made holes in the upper zone of the WTB beam at a depth of about 7 cm, thus realizing the connection (composite action) of the WTB blade with the deck slab. The concrete crossbeams reinforced with GFRP bars are designed at both ends, similarly to the bridge slab. The bridge slab has a minimum thickness of 18 cm, while the crossbeams are 50 cm wide. Both the deck slab and the crossbeams are made of unconventional concrete class C35/45, in which 5% of the coarse aggregate by weight was replaced with crushed propeller chips with a fraction of up to 3 cm (in order to increase the scope of recycling potential).

The hybrid girders described above can be used to build footbridge spans up to 12 m long and with a deck width of up to 2.0 m. It is possible to double the width of the deck by using two girders (both halves of the WTB). The total height of the span varies from 30 to 90 cm. The height of the end crossbeams is about 100 cm. The girders are able to withstand live loads of 5.0 kN/m^2 in accordance with the PN-EN 1991-2 standard [12].

The concept of a hybrid span made of Vestas girders

The second concept involves using parts of wind turbine blades (WTB) type Vestas V-66 manufactured by Danish company Wind System A/S for the construction of footbridge and bridge spans, which, like LM29.1, were withdrawn from service after 20 years. A single V-66 wind turbine blade has a total length of about 30 m and its height varies from 1460 to 2750 mm (Figure 4). The V-66 wind turbine blade is made of E-glass fibres and an epoxy resin matrix and has two main elements: a skin, which defines the shape, and an internal closed box beam, which consists of windward and leeward parts (spar caps) and webs. The girder webs are made of sandwich composites, while the flanges are made of solid composites. The WTB girders are manufactured by first cutting off the root and tip to obtain the designed beam length, then cutting off the remaining shell (loading and trailing edges), leaving only the inner closed-box beam. The box beam is used as the basic part of the hybrid girder, and the windward and leeward shells (spar caps) are the main load-bearing flanges. The flanges and webs are symmetrical laminates. The deck slab is connected to the box beams using M-20 class 8.8 steel bolts screwed with two nuts to the top flange of the beam with a torque of 300 Nm. The deck slab can be 18 or 21 cm thick and is made of concrete reinforced with GFRP bars, similarly to the LM girders. Alternatively, it is also possible to make a strip connection using two ribs of

łą część powłoki przecina się na dwa podobne elementy wzdłuż płaszczyzny środkowej, dzieląc WTB na dwie półskorupy. Obie części WTB mogą zostać użyte jako główny element nośny dźwigara hybrydowego przenoszącego obciążenia. W strefie górnej dźwigara hybrydowego projektuje się betonową płytę pomostową zbrojoną prętami GFRP. Zbrojenie składa się z dwóch siatek (dolnej i górnej) z prętów poprzecznych o średnicy 12 mm w rozstawie prętów 7 cm oraz prętów podłużnych o średnicy 10 mm w rozstawie 10 cm. Pręty poprzeczne siatki dolnej przechodzą przez wcześniej wykonane otwory w górnej strefie belki WTB na głębokości ok. 7 cm, łącząc części łopaty WTB z płytą pomostową. Na obu końcach zaprojektowane są poprzecznice zbrojone prętami GFRP podobnie jak płyta pomostowa. Płyta pomostowa ma grubość minimalną 18 cm, natomiast poprzecznice mają szerokość 50 cm. Zarówno płyta pomostowa, jak i poprzecznice są wykonane z betonu niekonwencjonalnego klasy C35/45, w którym 5% wag. ruszywa grubego zastąpiono rozdrobnianymi chipsami śmigieł o frakcji do 3 cm (w celu zwiększenia potencjału recyklingu).

Opisane dźwigary hybrydowe mogą być stosowane do budowy prześł kładek dla pieszych o rozpiętości do 12 m i szerokości pomostu do 2,0 m. Możliwe jest podwojenie szerokości pomostu w przypadku zastosowania dwóch dźwigarów (obie połowki powłoki). Wysokość całkowita prześła wynosi $30 \div 90 \text{ cm}$, a wysokość poprzecznic skrajnych ok. 100 cm. Dźwigary mogą przenieść obciążenia użytkowe $5,0 \text{ kN/m}^2$ wg PN-EN 1991-2 [12].

Koncepcja prześła hybrydowego z dźwigarów typu Vestas V-66

Druga koncepcja (rysunek 4) zakłada użycie fragmentów łopat turbin wiatrowych (WTB) typu Vestas V-66 do budowy prześł kładek i mostów, które podobnie jak LM 29.1 zostały wycofane z eksploatacji po 20 latach. Pojedyncza łopata turbiny wiatrowej V-66 ma długość całkowitą ok. 30 m i wysokość $1460 \div 2750 \text{ mm}$. Jest wykonana z włókien szklanych typu E i matrycy z żywicy epoksydowej. W przekroju poprzecznym WTB są dwa główne elementy: powłoka, która definiuje kształt oraz wewnętrzna belka skrzynkowa zamknięta, która składa się z części nawietrznej i zawietrznej (pasów) oraz środników. Środniki dźwigara są wykonane z kompozytów warstwowych, natomiast pasy z kompozytów litych. Dźwigary z WTB są wytwarzane w taki sposób, że najpierw odcina się nasadę i nosek, aby uzyskać zaprojektowaną długość belki, a następnie pozostałą część powłoki, pozostawiając jedynie wewnętrzną belkę skrzynkową. Belka skrzynkowa pełni funkcję podstawową części dźwigara hybrydowego, a powłoki nawietrzna i zawietrzna są głównymi pasami przenoszącymi obciążenie. Płyta pomostowa jest zespolona z belkami skrzynkowymi za pomocą śrub stalowych M-20 klasy 8.8 przykręconych dwiema nakrętkami do pasa górnego belki momentem dokręcenia 300 Nm. Ma ona grubość $18 \div 21 \text{ cm}$ i jest wykonana z betonu zbrojonego prętami GFRP jak w przypadku rozwiązania z dźwigarów typu LM. Istnieje możliwość zespolenia listwowego za po-

composite T profile glued with epoxy glue to the top flange. At both ends of the hybrid girder, approximately 50 cm thick concrete crossbeams reinforced with GFRP bars are also designed, similarly to the bridge slab.

This hybrid girders can be used to build bridges with a span of up to 10 m and a deck width of up to 11 m with a girder spacing of about 1.4 m and footbridges with a span of up to 16 m and a deck width of up to 4.0 m with a girder spacing of about 2.0 m. The total height of the bridge span (girder and slab height) will range from about 70 cm to 145 cm. The height of both crossbeams will be about 140 cm. The girders are able to transfer live loads of the LM-1 model and a pedestrian live load of 5.0 kN/m^2 in accordance with the PN-EN 1991-2 standard [12].

Numerical analysis and design procedure of bridge spans with WTB girders

In order to verify the basic limit states of the load-bearing capacity and serviceability of the span concept according to standards: [12 ÷ 15], the numerical analysis of three structural models was carried out using Finite Element Method (FEM): a footbridge with LM 29.1 girders and a footbridge and a road bridge with Vestas V-66 girders (Figures 5 and 6). Geometrical and material parameters were the result of measurements and tests of actual samples taken from the wind blades [16, 17]. The numerical models were developed in the Sofistik environment for both types of spans. Four-node elements of approximately $0.1 \times 0.2 \text{ m}$ (aspect ratio 0.5) were used to model all parts of the span. The connection between the WTB girders and the bridge deck was modeled using rigid elements.

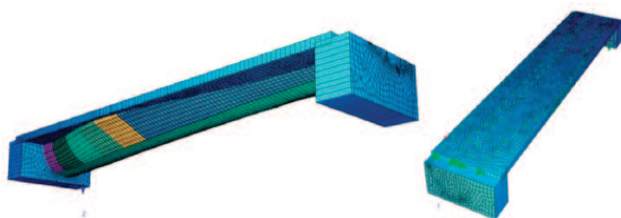


Fig. 5. Numerical model of the footbridge span with LM 29.1 girders

Rys. 5. Model numeryczny przęsła kładki z dźwigarami LM 29.1

In order to verify whether the proposed concepts of spans made of WTB girders are suitable for use in real footbridges and bridges, a preliminary analysis of the structure was carried out, assuming the following assumptions:

- adoption of geometric dimensions of WTB girders based on the conducted laser scanning according to [17];
- adoption of loads and actions according to the applicable Eurocodes together with partial load and combination factors;
- adoption of mechanical characteristics of laminates based on the conducted material tests according to [16];
- adoption of material safety factors as for FRP composites according to the current CEN/TS 19101 standard [13];
- verification of the ultimate limit state (ULS) of all composite laminates and concrete according to [13];

mocą dwóch żeber z profilu kompozytowego T przyklejonego klejem epoksydowym do pasa górnego. Na obu końcach dźwigara hybrydowego projektuje się również poprzecznicę betonową o grubości ok. 50 cm zbrojone prętami GFRP podobnie jak płyta pomostowa.

Opisane dźwigary hybrydowe mogą być stosowane do budowy mostów o rozpiętości do 10 m i szerokości pomostu do 11 m przy rozstawie dźwigarów ok. 1,4 m oraz kładek dla pieszych o rozpiętości do 16 m i szerokości pomostu do 4,0 m przy rozstawie dźwigarów ok. 2,0 m. Całkowita wysokość przęsła mostu (dźwigara i płyty) wynosi $70 \div 145 \text{ cm}$, a wysokość obu poprzecznicy ok. 140 cm. Dźwigary mogą przenieść obciążenia użytkowe modelu LM-1 oraz tłumem pieszych $5,0 \text{ kN/m}^2$ zgodnie z normą PN-EN 1991-2 [12].

Analiza numeryczna i projektowanie przęsła obiektów mostowych z dźwigarami WTB

W celu sprawdzenia stanów granicznych nośności i użytkowalności koncepcji przęsła wg [12 ÷ 15] przeprowadzono analizę numeryczną MES trzech modeli konstrukcyjnych: kładki dla pieszych z dźwigarami LM 29.1 oraz kładki dla pieszych i mostu drogowego z dźwigarami Vestas V-66. Parametry geometryczne i materiałowe konstrukcji wg [16, 17]. Ich modele numeryczne opracowane w środowisku Sofistik przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Do opisu przęsła wykorzystano elementy czterowzłowe o wymiarach ok. $0,1 \times 0,2 \text{ m}$ (współczynnik kształtu 0,5). Połączenie pomiędzy dźwigarami WTB a płytą pomostową zamodelowano za pomocą sztywnych elementów sprężystych.

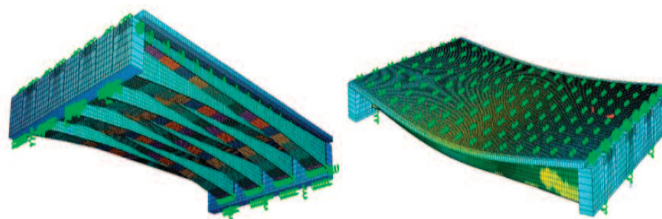


Fig. 6. Numerical model of the road bridge span with Vestas V-66 girders

Rys. 6. Model numeryczny przęsła mostu i kładki z dźwigarami Vestas V-66

W celu sprawdzenia, czy proponowane koncepcje przęsła z dźwigarów WTB nadają się do zastosowania w rzeczywistych kładkach i mostach, przeprowadzono wstępną analizę wymiarowania konstrukcji, przyjmując następujące założenia:

- wymiary geometryczne dźwigarów WTB na podstawie przeprowadzonego skaningu laserowego wg [17];
- obciążenie i oddziaływanie wraz z częściowymi współczynnikami obciążeń i kombinacji wg obowiązujących Eurokodów;
- charakterystyki mechaniczne laminatów na podstawie przeprowadzonych badań materiałowych wg [16];
- materiałowe współczynniki bezpieczeństwa jak w przypadku kompozytów FRP wg normy CEN/TS 19101 [13];
- sprawdzenie stanu granicznego nośności (SGN) laminatów kompozytowych i betonu wg [13];

• verification of serviceability limit states (SLS) for both WTB spans in terms of limiting the deflection to $L/300$ of the span according to [15].

The partial material safety factors for the assessment of the ultimate and serviceability limit states of laminates were adopted according to [13] and presented in Table 1.

The analysis and calculations performed showed that:

■ both materials: WTB laminates and concrete behave linearly elastically in the entire design load range,

■ the maximum utilisation of laminates strength using the FPF method (first layer failure) given by Maximum Failure Index for the Maximum Stress Criterion proposed in CEN/TS [13] was 0.46 for the LM girders structure and 0.82 for the Vestas girders (Table 2).

■ the maximum deflection from live loads according to the PN-EN 1991-2 standard [12] was 29.0 mm and 7.4 mm for spans with LM and Vestas girders, respectively, and was significantly lower than the permissible values $L/300$ equal to 40 mm and 26.7 mm, respectively,

■ the calculated first natural frequency of the span with LM girders was 3.32 Hz, and with Vestas girders 9.70 Hz, and they are higher than the recommended value of 3.0 Hz considered comfortable for bridge structures according to [18].

• sprawdzenie stanów granicznych użyteczności (SGU) obu przęseł WTB w zakresie ograniczenia ugięcia do $L/300$ rozpiętości wg [15].

Częściowe, materiałowe współczynniki bezpieczeństwa laminatów łopatek turbin wiatrowych wg [13] przyjęte do oceny stanów granicznych nośności i użyteczności przedstawiono w tabeli 1.

Przeprowadzona procedura wymiarowania koncepcji przęsła z dźwigarów WTB wykazała, że:

■ zarówno laminaty WTB, jak i beton zachowują się liniowo sprężyste w całym zakresie obciążenia projektowanego;

■ maksymalny poziom wyężenia laminatów z zastosowaniem metody FPF (zniszczenia pierwszej warstwy) za pomocą kryterium maksymalnych naprężeń zaproponowanych w CEN/TS [13] wyniósł 0,46 w przypadku konstrukcji z dźwigarów LM oraz 0,82 – dźwigarów z Vestas (tabela 2);

■ maksymalne ugięcie od obciążeń zmiennych wg PN-EN 1991-2 [12] wyniosło 29,0 i 7,4 mm odpowiednio w przypadku przęsła z dźwigarami LM oraz Vestas i było znacznie mniejsze od wartości dopuszczalnej $L/300$ odpowiednio 40 i 26,7 mm;

■ wyznaczona podstawowa częstotliwość drgań własnych przęsła z dźwigarami LM wyniosła 3,32 Hz, a z dźwigarami Vestas 9,70 Hz i są one większe od zalecanej wartości 3,0 Hz uznawanej za komfortową w przypadku obiektów mostowych wg [18].

Table 1. Partial safety factors for WTB laminates

Tabela 1. Częściowe współczynniki bezpieczeństwa w przypadku laminatów WTB

Characteristic/Charakterystyka	WTB type/Typ łopaty turbiny wiatrowej					
	LM				V 66	
Factor/Współczynnik	shell sandwich A/ laminat warstwowy A	spar cap B/ laminat lity powłoki B	shell sandwich C/ laminat warstwowy C	loading edge D/ laminat krawędzi natarcia D	spar cap/ laminat lity	shell sandwich/ laminat warstwowy
Deflection/Odchylenie v_x	0,1443	0,1306	0,1413	0,4536	0,235	0,0905
γ_{mi}	1,23	1,19	1,23	1,82	1,46	1,15
γ_{Rd}	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
η_c	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Material safety factors/Współczynnik materiałowy	2,133	2,063	2,133	3,155	2,5313	1,9938

Table 2. Maximum Failure Indices I_f for particulate WTB's laminates

Tabela 2. Maksymalne indeksy zniszczenia w przypadku laminatów WTB

Characteristic/Charakterystyka	WTB type/Typ łopaty turbiny wiatrowej					
	LM				V 66	
Maximum failure index/ Maksymalny indeks zniszczenia	shell sandwich A/ laminat warstwowy A	spar cap B/ laminat lity powłoki B	shell sandwich C/ laminat warstwowy C	loading edge D/ laminat krawędzi natarcia D	spar cap/ laminat lity	shell sandwich/ laminat warstwowy
I_f	0,46	0,27	0,37	0,18	0,68	0,82

Summary

Up-to-date scientific research conducted by RUT in the field of implementation of two new concepts of bridge structures made of dWTB has shown that both proposals are feasible to properly perform and implement, meet the requirements of the relevant standards and have sufficient safety margins. Further research work includes studies of key connections (for example, to obtain composite action between FRP and concrete) and tests of the load-bearing capacity,

Podsumowanie

Przeprowadzone badania dotyczące wdrażania dwóch nowych, hybrydowych konstrukcji mostowych z łopatek turbin wiatrowych i betonu potwierdziły, że są one możliwe do wykonania oraz spełniają wymagania odpowiednich norm. Przegląd istniejących obiektów mostowych z łopatek turbin wiatrowych wskazuje na wykorzystanie ich bez współpracy z betonem. Przedstawione dwa rozwiązania konstrukcji hybrydowych łączą w sobie zalety kompozytów FRP (laminaty WTB), tj. wy-

stiffness, and dynamic parameters of both girders on a full scale. If all the necessary requirements for bridge structures are confirmed, the construction of a demonstration facility and further long-term traffic tests along with monitoring of the most important elements of the structure are planned. The positive results of these studies will allow definitive confirmation that the proposed method of recycling WTB can be a good alternative to the disposal of this burdensome waste.

The work was created as part of research and development projects:

- "WTBridge" – Hybrid girder made of recycled wind turbine blades and unconventional concrete for the construction and modernization of bridge structures equipped with fiber optic sensors for monitoring the structure, as part of the LIDER XIII competition financed by the National Center for Research and Development (project no. 0031/L-13/2022)

- "Regional Center of Excellence in Engineering for the Quality of Life and Technology Development", financed by the subsidy of the Minister of Science and Higher Education under the Regional Excellence Initiative program (project no. RID/SP/0032/2024/01).

Received: 07.04.2025

Revised: 27.05.2025

Published: 23.07.2025

trzymałość i trwałość z zaletami betonu, tj. zwiększoną sztywnością, niewielkim kosztem oraz „pseudoplastycznym” sposobem zniszczenia. Dodatkową pozytywną cechą konstrukcji hybrydowych jest ich łatwość dostosowania do wymagań użytkowych.

Prowadzone są dalsze prace badawcze dotyczące zespolenia pomiędzy WTB a betonem, badania płyt pomostowych oraz badania statyczne i zmęczeniowe przedstawionych koncepcji dźwigarów hybrydowych z WTB i betonu. Pozytywne wyniki badań pozwolą na ostateczne potwierdzenie, że proponowane rozwiązanie przeszł z WTB mogą być alternatywą dla utylizacji tego uciążliwego odpadu.

Praca powstała w ramach projektów badawczo-rozwojowych:

- „WTBridge” – Hybrydowy dźwigar z recyklowanych łopat turbin wiatrowych i betonu niekonwencjonalnego do budowy i modernizacji obiektów mostowych wyposażony w czujniki światłowodowe do monitoringu konstrukcji, w ramach konkursu LIDER XIII finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (projekt nr 0031/L-13/2022);

- „Regionalne Centrum Doskonałości w Inżynierii dla Jakości Życia i Rozwoju Technologii”, finansowanego z subwencji Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach programu Regionalna Inicjatywa Doskonałości (projekt nr RID/SP/0032/2024/01).

Artykuł wpłynął do redakcji: 07.04.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 27.05.2025 r.

Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] GWEC (Global Wind Council) Global Wind Report – Annual Market Update 2017; Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium, 2017.
- [2] Mishnaevsky Jr. L., Branner L., Petersen, Beauson J., McGugan M., Sørensen BF. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. Materials. 2017.
- [3] Job S. Recycling glass fibre reinforced composites – history and progress. Reinforced Plastics. 2013.
- [4] Beauson J., Brondsted P. Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective. In: Ostachowicz W. et al. (eds.), MARE -WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology. Springer. 2016; https://doi.org/10.1007/978-3-319-39095-6_23.
- [5] Siwowski T., Rajchel M., Kulpa M., Adamcio A. Zastosowanie zużytych łopat turbin wiatrowych w budownictwie mostowym. Materiały Budowlane. 2021; 4.
- [6] Siwowski T., Rajchel M. Kształtowanie mostowych dźwigarów hybrydowych typu „kompozyt FRP – beton”. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (1/16), styczeń – marzec, 2016, s. 307-320.
- [7] Zhang C. Life cycle assessment (LCA) of fibre reinforced polymer (FRP) composites in civil applications. In: Pacheco – Torral F. et al. (eds.), Eco-efficient Construction and Building Materials, Woodhead Publishing. 2014; <https://doi.org/10.1533/9780857097729.3.565>.
- [8] Spek snij der S. Reuse of wind turbine blades in a slow traffic bridge. Masters Thesis, Faculty of Industrial Design Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 2018.
- [9] ReWind. Repurposing wind blades. Driving innovation in wind farm decommissioning. www.re-wind.info.

[10] <https://www.anmet.com.pl>.

[11] Rajchel M., Kulpa M., Wiater A., Siwowski T. Repurposing a Decommissioned Wind Turbine Blade for Bridge Construction: An Experimental Investigation. Journal of Composites for Construction ASCE, 29 (1), <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-4765>.

[12] EN 1991-2:2007. Eurocode 1: Actions on structures. Part 2: Traffic loads on bridges. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

[13] CEN/TS 19101. (2022). Design of fibre polymer composite structures. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

[14] ACI 440.1R-06. Guide for design and construction of structure concrete reinforced with FRP bars. American Concrete Institute, Farmington, Michigan, USA. 2006.

[15] BD 90/05 – Design of FRP Bridges and Highways Structures. Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Volume 1, Section 3, Part 17. The Highways Agency, Scottish Executive, Welsh Assembly Government, The Department for Regional Development Northern Ireland. 2005.

[16] Wiater A., Rajchel M., Siwowski T. FRP Material Properties of Various Decommissioned Wind Turbine Blades for Structural Repurposing. In CICE 2025: 12th International Conference on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (in press). 2025.

[17] Rajchel M., Kulpa M., Siwowski T. Repurposing of FRP composite decommissioned wind turbine blades in bridge construction. In CICE 2025: 12th International Conference on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering. 2025.

[18] EN 1990:2004. Eurocode 0: Basis of structural design. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.