

prof. dr hab. inż. Wojciech Lorenc<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0003-2693-1252

dr hab. inż. Maciej Kozuch<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-1743-5233

# Brittle fracture of a rolled I-beam under biaxial bending due to the low toughness of the steel and weakening by the bolt hole

*Kruche pęknięcie dwuteownika walcowanego w przekroju dwukierunkowo zginanym na skutek osłabienia otworem po śrubie*

DOI: 10.15199/33.2026.04.05

**Abstract.** The mechanism of a unique brittle fracture in a rolled section is demonstrated, not caused by fatigue crack propagation, but by cross-section overloading. The fracture was caused by the cross-section's load-bearing capacity being exhausted under biaxial bending and the presence of a bolt hole in the cross-section flange. The damaged element is a element of a steel bridge, and the phenomenon was observed as a result of several coincidences occurring during a flood. It sheds interesting light on the behavior of steel structures and, in the context of bridges in the Biała Łądecka Basin region, has broader implications for their further strengthening.

**Keywords:** brittle fracture; rolled steel I-beam; flood damage; composite bridges.

**Streszczenie.** Omówiono mechanizm unikatowego kruchego pęknięcia w kształtowniku walcowanym nie spowodowanego propagacją pęknięć zmęczeniowych, lecz przeciążeniem przekroju. Naszym zdaniem przyczyną pęknięcia było wyczerpanie nośności przekroju obciążonego dwuosiowym zginaniem oraz występowanie w przekroju pasa otworu na śrubę. Zniszczony element jest fragmentem mostu stalowego, a zaistnienie zjawiska było możliwe do zaobserwowania na skutek kilku zbiegów okoliczności występujących w trakcie powodzi. Rzuci ono ciekawe światło na zachowanie konstrukcji stalowych, a w przypadku mostów w rejonie kotliny Białej Łądeckiej ma szersze znaczenie w kontekście ich dalszego wzmocnienia. Artykuł ma charakter wstępnego komunikatu o przypadku, a pełna analiza ilościowa stanowi przedmiot dalszych badań.

**Słowa kluczowe:** kruche pęknięcie; stalowy dwuteownik walcowany; zniszczenia powodziowe; mosty zespolone.

In September 2024, the flood destroyed many bridges, including steel and composite ones made of rolled sections, located in the valley of the Biała Łądecka River in the Kłodzko region. The technical condition was assessed, a report [1] was prepared, as well as publications [2, 3]. The design and reconstruction of the bridges were then undertaken. This article concerns a steel bridge located near Chata Cyborga in the village of Bielice, in which a rare failure of a girder of the bridge was recorded. The analysis of the event, based on witness accounts combined with the observed nature of the crack, indicates that the water pressure caused horizontal bending of the rolled steel beams, combined with plastic yielding of the flanges (as in cold bending [4]), and subsequently the development of a bending moment acting on the beam about its strong axis. A rolled beam usually undergoes permanent plastic deformations under such conditions, but does not crack. In the analyzed case, however, cracking occurred (interpreted as brittle [5]).

The article analyzes the phenomenon and the failure mechanism, which are important in the case of other bridges repa-

W wrześniu 2024 r. powódź zniszczyła wiele mostów, m.in. stalowe i zespolone z kształtownikami walcowanymi usytuowane w dolinie Białej Łądeckiej na Ziemi Kłodzkiej. Dokonano oceny stanu technicznego, opracowano raport [1], a także publikacje [2, 3]. Przystąpiono do projektowania i odbudowy mostów. Artykuł dotyczy mostu stalowego zlokalizowanego przy Chacie Cyborga w miejscowości Bielice, w przypadku którego odnotowano rzadkie zniszczenie belki rusztu konstrukcji. Analiza zdarzenia na podstawie relacji świadków w połączeniu z zaobserwowanym charakterem pęknięcia wskazuje, że napór wody spowodował poziome wygięcie stalowych belek walcowanych połączone z uplastycznieniem pasów (jak przy gięciu na zimno [4]), a następnie powstanie momentu zginającego belkę względem silnej osi. Belka walcowana zazwyczaj doznaje trwałych deformacji plastycznych w takich warunkach, ale nie pęka. W analizowanym przypadku nastąpiło pęknięcie (zinterpretowane jako kruche [5]).

W artykule przeanalizowano zjawisko i mechanizm zniszczenia, istotne w przypadku pozostałych mostów, które naprawiano po powodzi w tym rejonie (i wykonanych z podobnych belek), a także w kontekście interpretacji zapisów Eurokodu 3.

<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

<sup>\*</sup> Correspondence address: maciej.kozuch@pwr.edu.pl

ired after the flood in this region (and made of similar beams), as well as in the context of interpreting the provisions of Eurocode 3.

### Analysis of the damaged beam

The structure of the analyzed bridge (Photo 1) consisted of rolled steel beams made of I320 I-sections, simply supported and braced with crossbeams, manufactured before World War II in German steelworks (other bridges of similar construction were also destroyed, while some survived the flood). Some bridges of this type had previously been strengthened by connecting the existing steel girders with a concrete slab, forming a composite structure.

After the flood, downstream of the location where the bridge had stood (on the downstream side), one of the elements of the destroyed span was found (I320 section). At the span location, a prestressed concrete pole of a power line was also lying, which, in our opinion, may have influenced the mechanism and moment of the bridge failure (Photo 1a and b). The beam was permanently bent about its weak axis (Photo 2a). In addition to plastic deformation of the flanges, a crack was observed in one of the cross-sections (denoted as A), where there was a hole in the bottom flange (in the beam's current location, which does not necessarily correspond to its position in the structure). In other cross-sections with holes, no such cracks were observed (Photo 2b). The holes were located on the tension side of the flange, assuming horizontal bending as the load causing plastic deformation of the beam. Another cross-section with a hole was denoted as B for further reference (Photo 2b). The geometry of the damaged beam represents a characteristic pattern of a simply supported beam subjected to horizontal bending.

Photo 3 shows damage to the paint coating of the steel structure, which makes it possible to infer the extent of plastic

### Analiza zniszczonej belki

Konstrukcję analizowanego mostu (fotografia 1) stanowiły stalowe belki walcowane z dwuteownika I320, swobodnie podparte, stężone poprzecznikami, wykonane przed drugą wojną światową w niemieckich hutach (inne mosty o podobnej konstrukcji również zostały zniszczone, a niektóre przetrwały powódź). Część tego typu mostów wcześniej zmodernizowano, zespalając istniejące dźwigary stalowe z płytą betonową.

Po powodzi poniżej miejsca, w którym znajdował się most, od strony wody dolnej, zlokalizowano jeden z elementów zniszczonego przęsła w postaci belki stalowej z dwuteownika I320, a w miejscu przęsła leżał słup strunobetonowy linii energetycznej, który naszym zdaniem mógł mieć wpływ na mechanizm i moment zniszczenia mostu (fotografia 1a i b). Belka została trwale wygięta względem słabej osi przekroju (fotografia 2a). Zaobserwowano w niej, oprócz deformacji plastycznych pasów, pęknięcie w jednym z przekrojów (oznaczonym jako A), w którym znajdował się otwór w pasie dolnym (w zastanej lokalizacji belki, co nie musi być tożsame z jej lokalizacją w konstrukcji), podczas gdy w innych przekrojach z otworami takich pęknięć nie było (fotografia 2b). Otwory znajdowały się od strony rozciąganej pasa, przyjmując zginanie poziome jako obciążenie powodujące deformacje plastyczne belki. Kolejny przekrój z otworem oznaczono jako B celem dalszego odniesienia do niego (fotografia 2b). Geometria zniszczonej belki przedstawia charakterystyczny obraz belki swobodnie podpartej zginanej poziomo.

Na fotografii 3 pokazano uszkodzenia farby konstrukcji stalowej pozwalające na wnioskowanie o zasięgu odkształceń plastycznych (ze względu na duże odkształcenia plastyczne farba traci przyczepność i odpada od powierzchni). Fotografii 3 wykonano w październiku 2024 r., a konstrukcja uległa

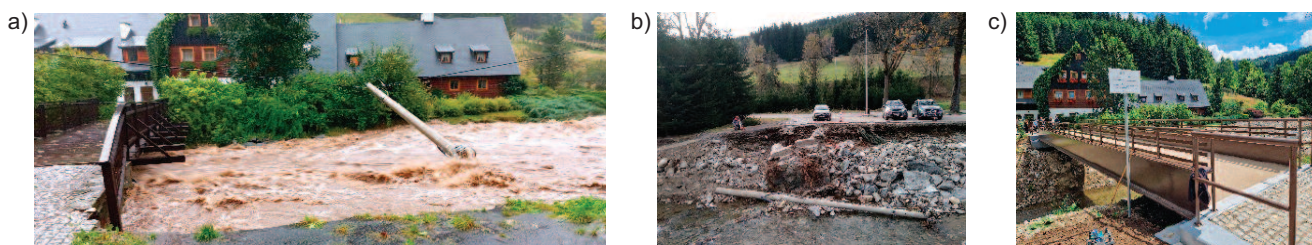


Photo 1. The bridge before destruction (a) (photo by Katarzyna Migala) and the damaged abutment and missing span after the flood (b) and the new bridge built in 2025 (c)

Fot. 1. Most przed zniszczeniem (a) (fot. Katarzyna Migala) oraz uszkodzony przyczółek i brak przęsła po powodzi (b), nowy most zbudowany w 2025 r. (c)



Photo 2. I320 steel beam with holes in the lower chord found below the bridge

Fot. 2. Belka stalowa I320 z otworami w pasie dolnym znaleziona poniżej mostu

deformations (due to large plastic strains, the paint loses adhesion and peels off the surface). Figure 3 was taken in October 2024, while the structure was destroyed on September 15, 2024. This information is important in the context of assessing paint damage and corrosion on the beams. In the region of action of a large bending moment of the beam in the horizontal direction, denoted as  $M_z$ , characteristic “patterns” are visible on the paint, indicating that the yield strength in the flanges was exceeded – both on the tension and compression sides of both flanges (Photo 3). Additionally, in the places where holes are present (only on the tension side of the flange, i.e., on the downstream side), a concentration of plastic strains can be observed both around the holes (Photo 3a) and on the opposite, compressed side of the flange (Photo 3b). The characteristic triangular shapes allow for clear identification of the extent of the plastic zones. The original marking of the beam applied in the steelwork is also visible. The extent of the plastic zones near the holes, from cross-section B to cross-section E, can be traced in Photo 4. Progressively smaller deformations were observed in cross-sections located closer to the beam supports. This makes it possible to infer, based on fundamental experience with bridges destroyed by floods [1], the mechanism of beam failure. As a result of water pressure, the load-bearing capacity of the element was exhausted due to bending in the horizontal direction, and the holes in cross-sections B to D (Photo 4) would not have had a significant influence on the failure mechanism in such a case. However, attention was drawn to cross-section A (and its crack), which is important in the context of further conclusions regarding the structure. The presence of the crack is not evident

zniszczeniu 15 września 2024 r. Informacja jest istotna w kontekście wnioskowania o uszkodzeniach farby i korozji na belkach. W obszarze działania dużego momentu zginającego belki na kierunku poziomym, oznaczonego jak  $M_z$ , widoczne są charakterystyczne „wzory” na farbie świadczące o przekroczeniu granicy plastyczności w pasach, zarówno od strony rozciąganej, jak i ściskanej obu pasów (fotografia 3). Dodatkowo w strefach występowania otworów (tylko po rozciąganej stronie pasa, czyli od strony wody dolnej) zauważyć można koncentrację odkształceń plastycznych zarówno w otoczeniu otworów (fotografia 3a), jak i po przeciwnej, ściskanej stronie pasa (fotografia 3b). Charakterystyczne trójkątne kształty pozwalają jasno wnioskować o zasięgu stref plastycznych. Widoczny jest również opis belki nadany jej w hucie. Zasięg stref plastycznych przy otworach, idąc od przekroju B do przekroju E, można prześledzić na fotografii 4. Stwierdzono coraz mniejsze odkształcenia w przekrojach zlokalizowanych bliżej podpory belki. Pozwala to wnioskować, mając oczywiście elementarne doświadczenia dotyczące mostów zniszczonych w wyniku powodzi [1], o mechanizmie zniszczenia belki. W wyniku parcia wody nastąpiło wyczerpanie nośności elementu wskutek zginania na kierunku poziomym, a otwory w przekrojach B ÷ D (fotografia 4) nie miałyby w takim przypadku znacznego wpływu na mechanizm zniszczenia. Zwrócono jednak uwagę na przekrój A (i jego pęknięcie), który jest istotny w kontekście dalszego wnioskowania o konstrukcji. Fakt występowania pęknięcia nie uwidacznia się na poziomie globalnej geometrii zniszczonego elementu. Nie można wykluczyć, że bez tego pęk-



**Photo 3. Interpretation of the state of deformation in the beam around section B – description in article**

*Fot. 3. Interpretacja stanu odkształceń w belce w okolicy przekroju B – opis w artykule*

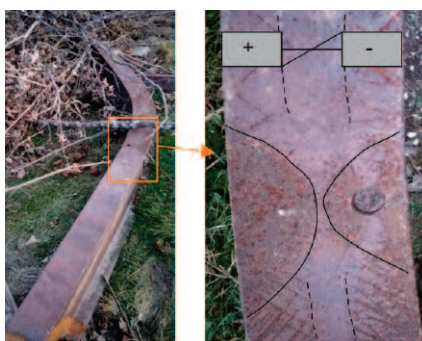


**Photo 4. The range of plastic zones at the openings going from cross-section B (span) to cross-section E (at the support)**

*Fot. 4. Zasięg stref plastycznych przy otworach, idąc od przekroju B (prześłowy) do przekroju E (przy podporze)*

at the level of the global geometry of the damaged element. It cannot be ruled out that, without this crack, the beam would not have been able to effectively carry the load from water pressure due to changes in geometry; however, this also cannot be confirmed.

An element of another bridge in Bielice, damaged in a similar manner, is shown in Photo 5. A greater curvature of the element is visible, and the hole is located on the compression side of the cross-section. A key issue is the very observation of a crack in the beam interpreted as brittle (since it had not been subjected to cyclic loading that could have led to fatigue cracking, which eventually might have developed into brittle fracture).



**Photo 5. An element of another bridge located nearby was damaged in a similar way: greater deformation of the element and a hole on the compression side of the cross-section**

*Fot. 5. Zniszczony w podobny sposób element innego mostu znajdującego się w pobliżu: większe deformacje elementu i otwór po stronie ściskanej przekroju*

## Crack analysis

Simplifying the issue and reducing various types of cracks in steel structures [5] to a single concept, the factors contributing to their occurrence include: low impact toughness of steel; low temperature; rate of load application; welding; notches; increasing thickness of the element; stiffness of the three-dimensional stress state; dominant tensile stresses; and cyclically varying loads. In bridge structures, fatigue cracks are common, and in some cases they may transition into brittle fracture. It is important to determine whether a crack may develop into an uncontrolled brittle fracture under service conditions, leading to sudden failure of the element. At first glance, it can be seen that the crack has propagated to approximately half the height of the web. At the same time, it is important to note that, due to the service conditions of the structure, a fatigue origin of the crack initiation can be excluded (in riveted bridge structures, cracks at holes are often fatigue-initiated). It is also reasonable to exclude cracks formed during manufacturing (as sometimes observed in thick cast elements), although this can only be confirmed by detailed microscopic analysis of the crack. Thus, this is a brittle crack that occurred in a standard rolled I-section (which was not welded), under the influence of an exceptional load of a static nature. The crack inventory is shown in Figure 6.

The crack initiated in the flange and then propagated through the web up to its compression zone. Figure 6b shows the ovalisation of the hole and the plastically deformed region of the flange (after failure, the hole is approximately elliptical with dimensions of  $20 \times 26$  mm and is located at about  $1/4$  of the width of the bottom flange). Photo 6c allows for the conclusion that the crack in the flange had a brittle character. It was noted that the crack did not initiate at the edge of the hole, in the region of the highest deformations and where the flange is thinner, but rather in a zone closer to the web. In this region, strains due to horizontal bending were smaller, while the element was thicker and the residual stresses from rolling were more tensile in nature. Moreover, this area is characterized by lower steel quality compared to regions near

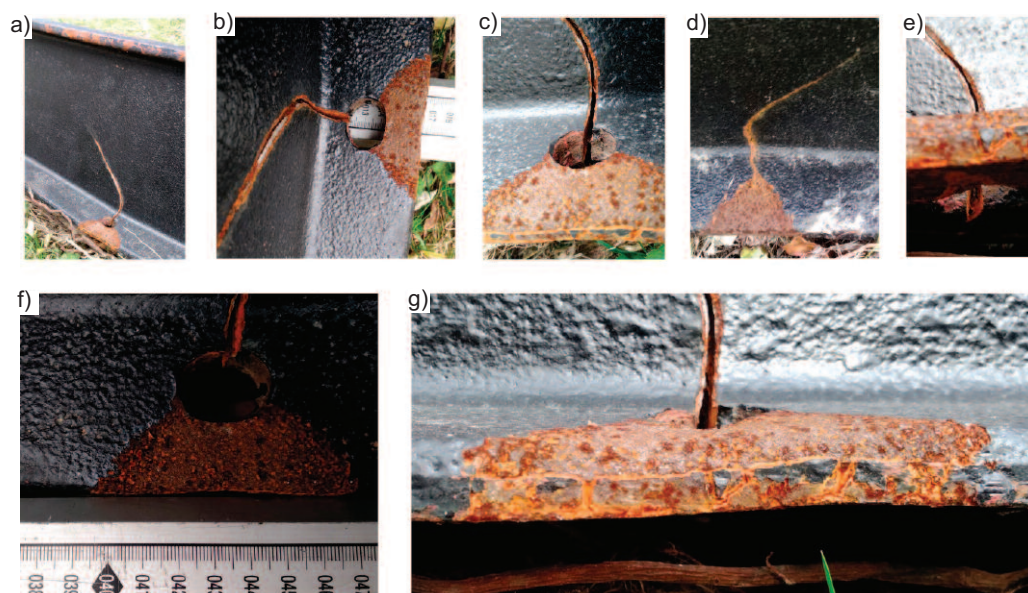
nięcia belka nie byłaby w stanie skutecznie przetranszować obciążenia od naporu wody na skutek zmian w geometrii, ale nie można też tego potwierdzić.

Zniszczony w podobny sposób element innego mostu znajdującego się w Bielicach pokazano na fotografii 5. Widoczna jest większa krzywizna elementu, a otwór znajduje się po stronie ściskanej przekroju. Kluczową kwestią jest to, że w ogóle zaobserwowano w belce pęknięcie interpretowane jako kruche, ponieważ nie była ona poddawana obciążeniom cyklicznym mogącym skutkować pęknięciem zmęczeniowym, które mogłyby się rozwijać w kruche.

## Analiza pęknięcia

Upraszczając zagadnienie i sprowadzając do jednego pojęcia różne rodzaje pęknięć w konstrukcjach stalowych [5], czynniki im sprzyjające to: mała uderzalność stali; niska temperatura; prędkość przyłożenia obciążenia; spawanie; karby; wzrost grubości elementu; sztywność przestrzennego stanu naprężenia; dominujące naprężenia rozciągające oraz obciążenia cyklicznie zmienne. W konstrukcjach mostów powszechnie występują pęknięcia zmęczeniowe, a w niektórych przypadkach mogą one przechodzić w kruche. Istotne jest, czy pęknięcie może przejść w niekontrolowane pęknięcie kruche w warunkach eksploatacji, skutkujące nagłym zniszczeniem elementu. Na pierwszy rzut oka widać, że mamy tu do czynienia z pęknięciem rozwiniętym do ok. połowy wysokości środnika. Jednocześnie istotna jest informacja, że z racji użytkowania obiektu można wykluczyć zmęczeniowy charakter inicjacji pęknięcia (w nitowanych konstrukcjach mostów pęknięcia przy otworach są często inicjowane zmęczeniowo). Uzasadnione jest też wykluczenie (spotykane w np. odlewach o dużej grubości) pęknięć powstałych w trakcie wytwarzania elementu, choć to potwierdzić może szczegółowa analiza mikroskopowa pęknięcia. Jest to zatem pęknięcie kruche powstałe w standardowym dwuteowniku walcowanym (który nie był spawany), pod wpływem dużego obciążenia o charakterze statycznym. Inwentaryzację pęknięcia pokazano na fotografii 6.

Pęknięcie powstało w pasie, a następnie propagowało przez środnik aż do jego strefy ściskanej. Na fotografii 6b widoczna jest owalizacja otworu i uplastyczniona część pasa (otwór po zniszczeniu jest w przybliżeniu elipsą o przekroju  $20 \times 26$  mm i znajduje się w  $1/4$  szerokości pasa dolnego), a fotografia 6c pozwala wnioskować o kruchym charakterze pęknięcia w pasie. Zwrócono uwagę na fakt, że pęknięcie nie powstało na krawędzi otworu w strefie największych odkształceń i w miejscu, gdzie pas jest cienki, lecz w strefie bliżej środnika. Tam odkształcenia od zginania poziomego były mniejsze, a element grubszy, natomiast naprężenia własne po walcowa-



**Photo 6. Analyzed crack from different perspectives**  
 Fot. 6. Analizowane pęknięcie w różnych ujęciach

the flange edges, which forms a logical sequence of factors. Further quantitative analysis is desirable (after material testing and FEM simulations), which will ultimately be carried out. Photos 6d and 6e show the propagation of the crack in the flange up to the plastically deformed compression zone of the flange cross-section, while Photo 6f shows plastic necking of the flange plate similar to that observed in axial tensile testing of steel specimens.

Large plastic deformations did not cause cracking. Deformation of the flange in the web plane was observed, indicating the action of a significant transverse force. The nature of the fracture indicates the presence of a large bending moment about the strong axis of the cross-section, i.e.  $M_y$ , as well as a shear force  $V_z$  in the web plane (independently of the bending moment about the weak axis of the section, which caused plastic deformation of the flanges). This leads to the conclusion that the crack initiated in the flange due to the combined action of the bending moments  $M_y$  and  $M_z$ , which determined the nature of its propagation in the flange (Photo 6e). Propagation in the web was driven by the positive bending moment  $M_y$ , but in combination with the shear force  $V_z$ , as indicated by the inclination of the crack (the authors have experience with similar cracks, although previously fatigue-initiated [6]). Figure 1 shows the extent of the plastically deformed zones in the flange at cross-section B, which did not fail and was located near cross-section A. The dashed line indicates the location corresponding to the exceedance of plastic deformation (on both sides of the flange). With this in mind, the failure of cross-section A can be more easily understood, as at this stage no other bending effects about the strong axis are observed apart from the fracture of cross-section A.

Taking into account eyewitness reports from the flood and the column shown in Photo 1c, its contribution to the development of bending is considered possible. The influence of temperature does not appear to be critical, as the flood

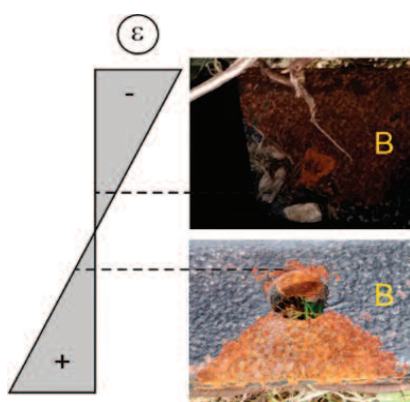
niu bardziej rozciągające. Ponadto jest to strefa o gorszej jakości stali niż w pobliżu krawędzi pasów, co stanowi logiczny ciąg. Wskazana jest dalsza analiza ilościowa (po wykonaniu badań materiałowych i symulacji za pomocą MES), która docelowo zostanie wykonana. Na fotografiach 6 d i e widoczna jest propagacja pęknięcia w pasie aż do uplastycznionej strefy ściskanej przekroju pasa, a na fotografii 6f plastyczne przewężenie blachy pasa podobne jak w osiowej próbie rozciągania próbki stalowej.

Duże odkształcenia plastyczne nie spowodowały pęknięcia. Zaobserwowano deformację pasa w płaszczyźnie środnika wskazującą na działanie istotnej siły poprzecznej. Charakter pęknięcia wskazuje na występowanie dużego momentu zginającego względem silnej osi przekroju, czyli  $M_y$  oraz siły poprzecznej  $V_z$  w płaszczyźnie środnika (niezależnie od momentu zginającego względem słabej osi przekroju, który spowodował uplastycznienie pasów). Prowadzi to do wniosku, że pęknięcie zainicjowało się w pasie na skutek działania momentu  $M_y$  wraz z momentem  $M_z$ , co determinowało jego charakter propagacji w pasie (fotografia 6e). Propagację w środniku powodował dodatni moment  $M_y$ , ale w połączeniu z działaniem siły poprzecznej  $V_z$ , na co wskazuje pochylenie pęknięcia (autorzy mają doświadczenie z tego typu pęknięciami, ale inicjowanymi zmęczeniowo [6]). Rysunek 1 pokazuje zasięg stref uplastycznionych w pasie w przekroju B, który nie uległ pęknięciu, a znajdował się w pobliżu przekroju A. Linia przerywaną zaznaczono miejsce wskazujące na przekroczenie odkształceń plastycznych (po obu stronach pasa). Mając to na uwadze, łatwiej zrozumieć zniszczenie przekroju A, ponieważ na obecnym etapie nie widać innych efektów zginania względem silnej osi niż pęknięcie przekroju A.

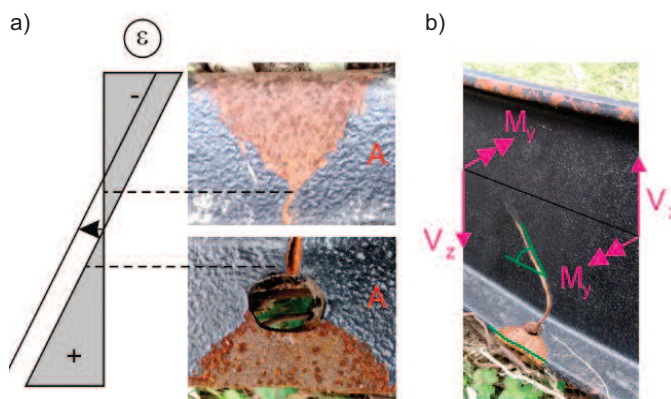
Uwzględniając relacje z powodzi i słup pokazany na fotografii 1c, dopuszcza się jego udział w powstaniu zginania. Wpływ temperatury nie wydaje się kluczowy. Powódź była bowiem we

occurred in September, meaning that low temperatures were not present. The influence of load dynamics cannot be determined, nor can the exact moment at which the beam fractured. The assumption that the crack occurred during the bridge failure has no basis, despite it appearing plausible. At present, an analysis of the bridge structure is being carried out in order to determine the original position of the beam (access to data on the damaged structure is required).

Figure 2 shows cross-section A, presenting a deformation pattern justified by the analysis, which is displaced toward the tension zone due to the action of the bending moment  $M_y$  (Figure 2a). Internal bending forces about the strong axis determine the character and geometry of the crack (Figure 2b). The influence of the shear force  $V_z$  is marked in green, in the form of crack deviation from the vertical, with propagation upward along the web. The analysis indicates that we are dealing with a brittle fracture of a rolled I-section occurring near a hole, unrelated to structural fatigue, which is an interesting but very rare phenomenon.



**Fig. 1. Strains in the flange due to horizontal bending in section B**  
Rys. 1. Odkształcenia pasa na skutek zginania poziomego w przekroju B



**Fig. 2. Strains in the flange due to horizontal bending in section A**  
Rys. 2. Odkształcenia pasa na skutek zginania poziomego w przekroju A

## Conclusions

In steel and composite structures, rolled I-sections are designed under the assumption of high steel ductility and the ability of the cross-section to rotate during the formation of a so-called plastic hinge. Brittle fracture is not permitted. In the case of modern steels and in structures without holes, very large cold-bending curvatures can be achieved, and elements do not fail in a brittle manner [4]. It has been clearly demonstrated that in a doubly curved I-section, brittle fracture occurred due to the presence of a hole. The collected information indicates that the fracture was not fatigue-initiated. In order to further interpret the observed phenomenon, material testing is required. Additional information on the bridge failure is currently being gathered.

Based on the performed analysis, a brittle fracture was identified in the cross-section with a hole, caused by exhaustion of the material load-bearing capacity near the hole under biaxial bending. The cause was not steel fatigue. The assessment was limited to visual inspection of the fracture. The collected material is sufficient to conclude the brittle nature of

wrześnie, zatem nie było niskiej temperatury. Wpływ dynamiki obciążenia jest niemożliwy do ustalenia, podobnie jak moment, w którym belka uległa pęknięciu. Przyjęcie założenia o powstaniu pęknięcia w trakcie awarii mostu nie ma podstaw mimo tego, że wydaje się to prawdopodobne. Obecnie jest prowadzona analiza konstrukcji mostu w kontekście ustalenia lokalizacji belki (konieczne jest dotarcie do danych o zniszczonej konstrukcji).

Na rysunku 2 pokazano przekrój A, przedstawiający: uzasadniony analizą układ odkształceń, który ulega przesunięciu w stronę rozciągania na skutek działania momentu  $M_y$  (rysunek 2a) oraz siły wewnętrznej od zginania względem silnej osi determinujące charakter i geometrię pęknięcia (rysunek 2b). Na zielono oznaczono wpływ siły poprzecznej  $V_z$  w postaci odchylenia pęknięcia od pionu wraz z przebiegiem w górę środnika. Z analizy wynika, że mamy do czynienia z kruchym pęknięciem dwuteownika walcowanego w pobliżu otworu niezwiązanym ze zmęczeniem konstrukcji, co jest ciekawym zjawiskiem, ale bardzo rzadko spotykanym.

## Wnioski

W konstrukcjach stalowych (i zespolonych) dwuteowniki walcowane projektuje się, zakładając dużą ciągliwość stali i zdolność do obrotu przekroju przy wytwarzaniu tzw. przegubu plastycznego. Nie dopuszcza się ich kruchego pęknięcia. W przypadku nowych stali i w konstrukcjach bez otworów można osiągać bardzo duże krzywizny przy gięciu na zimno i elementy nie pękają krucho [4]. Jednoznacznie wykazano, że w dwuteowniku zginanym dwukierunkowo nastąpiło kruche pęknięcie spowodowane obecnością otworu. Zebrane informacje wskazują, że nie było ono inicjowane zmęczeniem stali. W celu dalszego wnioskowania o zaobserwowanym zjawisku konieczne jest przeprowadzenie badań materiałowych. Zbierane są dodatkowe informacje o zniszczeniu mostu.

Na podstawie dotychczasowej analizy stwierdzono kruche pęknięcie w przekroju z otworem, spowodowane wyczerpaniem nośności materiału w pobliżu tego otworu na skutek zginania dwukierunkowego, a przyczyną nie było zmęczenie stali. Ograniczono się do oceny pęknięcia na podstawie oceny wi-

the fracture and biaxial bending as the loading condition responsible for its initiation. Stress analysis is not currently part of the study, nor are material tests; however, these will be carried out at a later stage. At present, it is difficult to determine whether microscopic fracture analysis, considering corrosion, will provide additional conclusions regarding the precise location of crack initiation, although such analysis is planned. The mechanism of crack initiation requires material testing; at this stage it cannot be stated whether it occurred at the hole. The fact that the material was exposed to river-environment conditions for approximately one month after the flood (leading to corrosion) is crucial. There is a risk that the crack initiation site may not be determined; however, this does not affect the conclusions presented.

### Acknowledgements

*The authors would like to express their gratitude to Ms. Jolanta Lignarska from Chata Cyborga for providing materials (videos, photographs, and oral reports) documenting the destruction of the bridge during the flood, as well as information on the earlier history of this structure. The authors are also thankful for assistance in handling the damaged structural elements in order to secure them for further testing.*

*Received: 30.12.2025*

*Revised: 19.01.2026*

*Published: 22.04.2026*

zualnej. Zebrany materiał jest wystarczający, aby wnioskować o kruchym charakterze pęknięcia i zginaniu dwukierunkowym jako obciążeniu powodującym jego powstanie. Określanie naprężeń nie jest obecnie przedmiotem analizy, podobnie jak badania materiałowe; ale będą realizowane na dalszym etapie. Obecnie trudno stwierdzić, czy analiza mikroskopowa pęknięcia, mając na uwadze jego korozję, dostarczy dodatkowych wniosków dotyczących precyzyjnego miejsca inicjacji pęknięcia, ale przewiduje się jej wykonanie. Mechanizm inicjacji pęknięcia wymaga badań materiałowych, na tym etapie nie można stwierdzić, czy wystąpiła ona przy otworze. Sam fakt zabezpieczenia materiału nad rzeką ok. miesiąca po powodzi (korozja) jest kluczowy. Istnieje bowiem ryzyko, że nie ustalą się miejsca inicjacji pęknięcia, co jednak nie wpływa na zaprezentowane wnioskowanie.

### Podziękowania

*Autorzy składają podziękowania Pani Jolancie Lignarskiej z Chaty Cyborga za dostarczenie materiałów (filmów, zdjęć, relacji ustnych) opisujących zniszczenie mostu w trakcie powodzi oraz informacje na temat wcześniejszej historii tej konstrukcji, a także za pomoc w postępowaniu ze zniszczonymi elementami konstrukcyjnymi w celu ich dalszego zabezpieczenia do badań.*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 30.12.2025 r.*

*Otrzymano poprawiony po recenzjach: 19.01.2026 r.*

*Opublikowano: 22.04.2026 r.*

### Literature

[1] Biliszczuk J, Lorenc W. Wytyczne odbudowy infrastruktury mostowej uszkodzonej w czasie powodzi we wrześniu 2024 r. na Ziemi Kłodzkiej. Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. 2024, Ser. SPR nr 58, 49 s.

[2] Biliszczuk J, Lorenc W, Teichgraber M, Pustelnik M. Propozycja wytycznych odbudowy infrastruktury mostowej zniszczonej w czasie powodzi we wrześniu 2024 r. na Ziemi Kłodzkiej i południowej Opolszczyźnie. Inżynieria i Budownictwo. 2024, R. 80, nr 7, s. 395-398.

[3] Biliszczuk J, Lorenc W, Kozuch M, Pustelnik M. Reconstruction plan for transport infrastructure in the flood-affected area (2024) in the Kłodzko Valley. IABSE Congress Ghent 2025: The Essence of Structural Engineering

for Society: Ghent, Belgium, 27-29 August 2025 / eds. Davide Leonetti [i in.]. Zurich: IABSE, [2025]. s. 1944-1951.

[4] Marcinczak K. Proposed cold deformation limitation for steel I-beams made of S460M. W: Advances in steel and steel-concrete composite structures: bridging science and industry: Proceedings of the 15th International Conference on Metal Structures (ICMS 2025), Wrocław, Poland, May 28th-30th, 2025/eds. Wojciech Lorenc [i in.]. Abingdon; New York: Routledge, cop. 2025. s. 37-42.

[5] Rykaluk K. Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. Wrocław: Dolnośl. Wydaw. Nauk, 1999. 232 s.

[6] Kozuch M, Rowiński S. Elastic behaviour of the steel part of a shear connection with MCL composite dowels: design basis for serviceability and fatigue limit states. Steel Construction. 2016, vol. 9, nr 2, s. 107-114.