



ŚLAWOMIR KARAS

Politechnika Lubelska
s.karas@pollub.pl
ORCID: 0000-0002-0626-5582



IZABELA KAMIŃSKA

Generalna Dyrekcja Dróg
Krajowych i Autostrad
ikaminska@gddkia.gov.pl

Rozważania o mostach drewnianych i najstarszym moście drewnianym na Lubelszczyźnie

Między Janowem Lubelskim a Porytowym Wzgórzem w Lasach Janowskich jest około 10 km jazdy samochodem. Na Porytowym wzgórzu jest pomnik bitwy partyzanckiej, która miała miejsce 14 czerwca 1944 r. Kilka oddziałów partyzanckich, o liczebności około 3,5 tysiąca ludzi, zostało okrążonych przez wojsko niemieckie. Po całodziennym bitwie, od świtu do nocy, partyzanci wydostali się z kotła. W historii walk partyzanckich bitwa jest uznawana za duży sukces, [1] (Gąsowski, et al., 1999).

sów antycznych do współczesności. Proponowany przegląd pokaże znaczenie mostów w różnych aspektach, poczynając od znaczenia militarnego, do ich powszedniej roli jako obiektów cywilnych.

Współcześnie definicja mostu drewnianego nie jest jednolita. Korzystając z Wikipedii [2] mamy – *most drewniany lub most z drewna to most, który wykorzystuje drewno jako główny materiał konstrukcyjny*, podobne definicje znajdujemy w innych źródłach, przy czym w rozwinięciu definicji wymieniane są różne przykłady mostów, poczynając od antyku i kończąc na realizacjach współczesnych.

W innej wersji encyklopedii [3] znajdujemy – *w historii mostownictwa most drewniany jest najstarszym typem konstrukcji w budownictwie mostowym; począwszy od pnia drzewa, który był układany w poprzek wąwozu lub zbiornika wodne-*

W sąsiedztwie Porytowego Wzgórza przepływa rzeka Branew, nad którą został wybudowany w roku 1941 most drewniany kolejki wąskotorowej. Może to być najstarszy w całości drewniany most w Polsce (rys. 1).

Most w Lasach Janowskich jest ostatnim funkcjonującym mostem w całości drewnianym na Lubelszczyźnie. Obecnie pełni funkcję mostu dla pieszych. W roku 1988 zakończono rozbiórkę nawierzchni kolejowej, nasypy uległy degradacji.

Zanim rozpoczniemy omawianie mostu na Porytowym Wzgórzu, dokonajmy krótkiego przeglądu mostów drewnianych od cza-

a)



b)



Rys. 1. Most drewniany przez rzekę Branew (2022), wiosna: a) widok od strony górnej wody – GW, b) widok mostu od strony dolnej wody – DW

go; sztuka konstrukcji drewnianych została udoskonalona do mostów jarzmowych lub kratownicowych; ponieważ drewno ma bardzo niski ciężar właściwy, nadaje się szczególnie do budowy mostów; rozróżnia się mosty drewniane kryte i niekryte.

Pewne jest, że most drewniany jest wtedy, gdy jego wszystkie elementy – fundamenty, podpory, ustrój nośny, pomost, balustrady, łączniki i inne elementy wyposażenia są wykonane z drewna litego.

Jednakże już w cytowanych książkach Maksymiliana Thulliego, podpory mostów są kamienne, a niektóre ścigi są stalowe. Granicznym przypadkiem są współczesne mosty budowane z wykorzystaniem drewnianego pomostu, natomiast podpory są żelbetowe, a ustrój nośny jest często rusztem stalowym.

W tym artykule będzie stosowany termin *mosty drewniane* do wszystkich obiektów, nawet do tych, których tylko pomost jest drewniany.

Mosty drewniane z czasów rzymskich

Drewno w postaci bali drewnianych było najlepszym i najstarszym budulcem mostów o znaczeniu tymczasowym, w tym w szczególności wojskowym. Jako przykład przywoływane są mosty drewniane przez Ren (łac. *Rein*) wybudowanych przez legionistów Juliusza Cezara podczas dwóch wojen Rzymu z Gallami (55 i 53 p.n.e.). Celem wojny było podbicie Galii, jednakże jednocześnie konieczne było chro-

nienie tyłów całej wyprawy przed Germanami, dlatego Cezar przekroczył Ren i najechał Germanów. Mosty przez Ren były sytuowane niedaleko na północ od obecnego Aachen. Po zakończeniu każdej kampanii wspomniane mosty były niszczone.

Andrea Palladio, po przestudiowaniu pamiętników Juliusza Cezara, [4] (Andrea Palladio, 1570), sporządził rysunek mostu Cezara (rys. 2.a). Wyobrażenie mostu na rycinie było wielokrotnie krytykowane, nie ze względu na sztukę budowy mostów, ale dlatego że bale drewniane są kantówkami. Były też uwagi merytoryczne. Jednakże liczba odnalezionych w Renie i sąsiedztwie dowodów archeologicznych jest minimalna i dlatego podstawowym źródłem informacji są pamiętniki Juliusza Cezara [5] (J. Cezar, 1978).

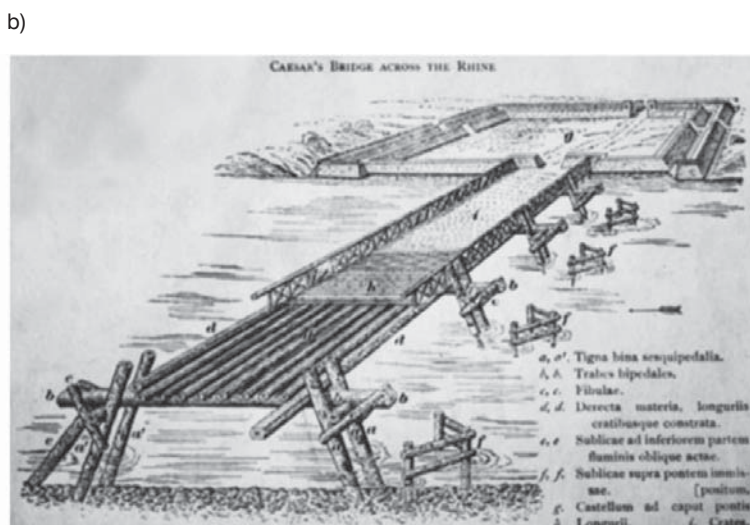
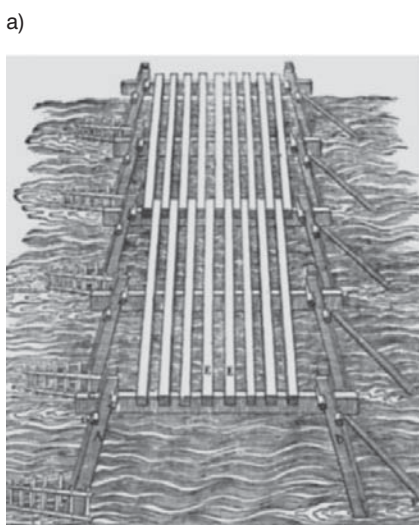
Zmodyfikowaną wersję mostu przedstawił Francis Kelsey [6] (Kelsey, 1918), ukazując zastosowanie nieociosanych pni drewnianych (rys. 2.b).

Drugim znanym mostem drewnianym z okresu cesarstwa rzymskiego jest most przez Dunaj, zbudowany podczas wojny Rzymu z Dakami w roku 105 n.e. w sąsiedztwie obecnego miasta w Rumunii Drobeta-Turnu Severin. Nie był to most w pełni drewniany. Łukowe dźwigary pomostu wykonano jako drewniane, natomiast filary i przyczółki mostu zbudowano z betonu na antycznym cemencie opisanym przez Witruwiusza [7], (Vitruvius, ~1470), jako *pozzolana*¹ lub znanym

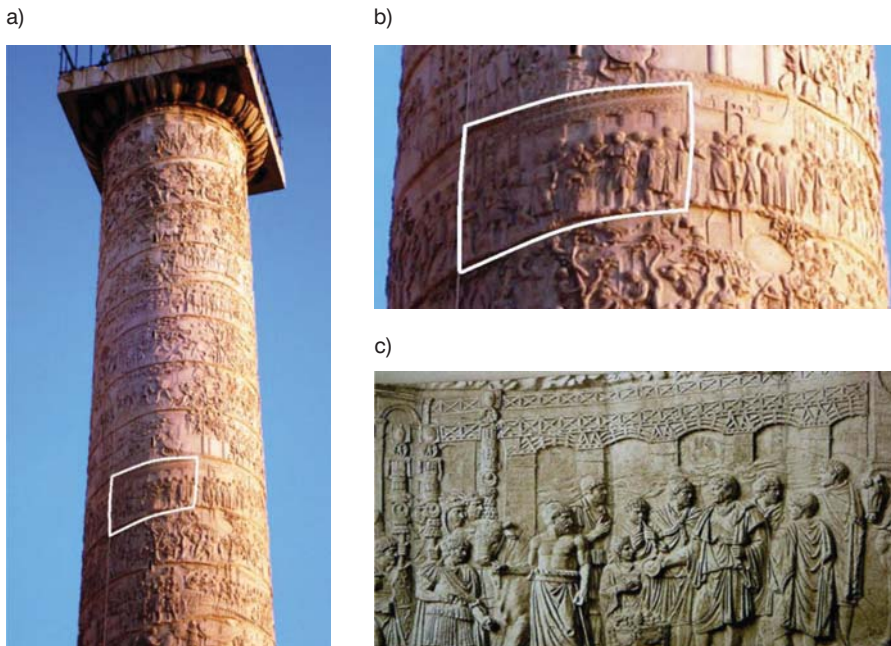
¹ Grecy w czasach antycznych stosowali popioły po wybuchu wulkanu na Santorini (Thera) do uszczelniania cystern wodnych już około 600 roku p.n.e.

Rys. 2. Schematy mostów Cezara przez Ren:

a) wg. Andrea Palladio,
b) schemat mostu przez Ren wg. Francis Kelseya



Rys. 3. Turnu-Severin, pozostałości filarów mostu Trajana (Wikimedia Commons)



Rys. 4. Kolumna Trajana: a–c) relief, fragment obrazujący most Trajana przez Dunaj (Wikimedia Commons)

z innych źródeł jako *opus caementicium* (rys. 2). Do budowy filarów zastosowano technologię stabilizującą *cofferdam*, która była znana przez Persów od co najmniej 539 r. p.n.e. W skrócie, *cofferdam* to budowa zamkniętej obudowy ze stykających się pobocznkami pali drewnianych, która była wypełniana gruntem, piaskiem etc. *Cofferdam* odpowiada drewnianej ścianie szczelnej przy budowie przyczółków lub filarów, obecnie zamiast pali lub ścianek drewnianych często są stosowane grodzice.

Most miał około 1 km długości, jego projektantem i budowniczym był Apollodorus z Damaszku. Nadmienimy, że Apollodorus zbudował także tzw. pierwszy most przez Dunaj w czasie I wojny dackiej prowadzonej przez cesarza Domitjana (101–102 n.e.), był to most tymczasowy pontonowy. W czasie II wojny dackiej (105 n.e.) Apollodorus zbudował trwałe drugie dla wojsk Trajana. Do dziś zachowały się pozostałości przyczółków i filarów oraz fundamenty mostu, widoczne w kilku miejscach jako wyniesienia betonowe nad powierzchnią gruntu lub lustrem wód Dunaju. Istniejące residualne fragmenty podpór są oddzielone wybudowaną spe-

cialnie w tym celu ostrogą, chroniącą je od wartkiego w tym miejscu nurtu rzeki.

W Rzymie, będąc na Forum Trajana w sąsiedztwie kolumny Trajana, nie jest łatwo dostrzec ten fragment reliefu, który ukazuje most Trajana/Apollodorusa przez Dunaj. Relief jest po stronie północnej, mniej więcej w połowie jej wysokości. Obserwując z poziomu ulicy interesujący nas relief, trudno dopatrzeć się drewnianego łukowego pomostu, dlatego na rysunku 4.c zamieszczono dodatkowy płaski relief, na którym widoczny jest układ prętów drewnianych.

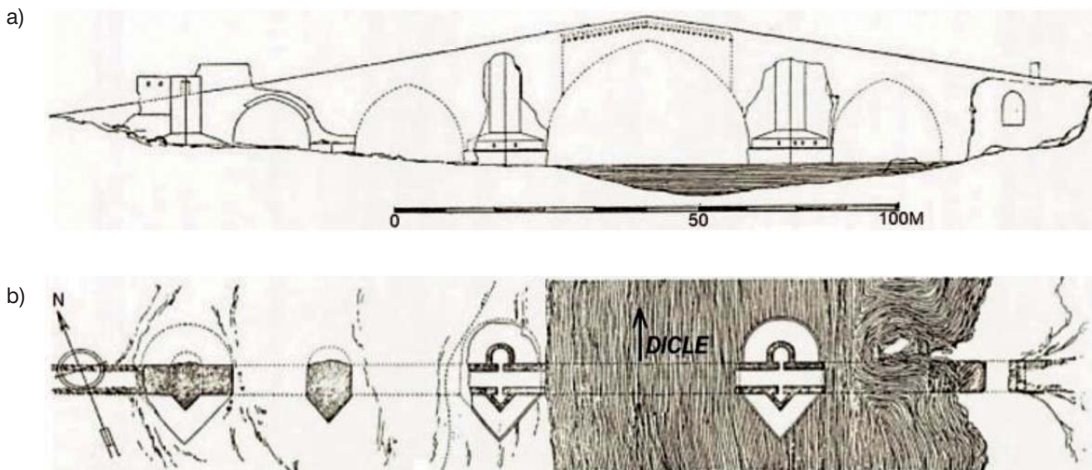
Mosty Cezara i Trajana są powszechnie znane i są przywoływane właściwie przy każdej okazji. Na pewno mniej znanym obiektem jest most przez rzekę Tygrys (nazwa rzeki w języku tureckim i kurdyjskim to Dicle) w kurdyjskiej wsi Hasankeyf położony w prowincji Batman w południowej Turcji (rys. 5).

Zasiedlanie tego miejsca jest szacowane na około sześć tysięcy lat, poczynając od Sumerów i Asyryjczyków, a następnie przez Babilończyków, Medów, Persów, Bizantyjczyków, Umajadów, Abbasydów, Hamdaniler, Artuqidów, Mervaniler, Seldżuków, Ajjubidów, Mongołów, Osmanów i Turków. W XX i XXI wieku nie prowadzono znacznych prac archeologicznych. W roku 2020 ruiny mostu zostały zatopione przez wezbranie wody rzeki Tygrys spowodowane uruchomieniem tamy w miejscowości Ilisu usytuowanej około 15 km w dół rzeki. Przeniesienie wsi Hasankeyf w nieodległe miejsce i zalanie znacznych obszarów spowodowało, że potencjalnie bogata część historii tego miejsca nie będzie dostępna przez długi czas.

Opisywany obiekt został wzniesiony jako zamiennik starszego mostu w tym miejscu, w roku 1116 przez władcę Artuqidów Fahrettina Karaaslana, potomka Saladyna. Jego kształt nawiązuje do architektury arabskiej (rys. 6). Elementem obronnym mostu było główne przęsło, które wykonano jako drewniane. W czasie wrogiego napadu przęsło było demontowane lub zwyczajnie palone. Nie obroniło to miasta podczas najazdu Mongołów w 1260 roku. Od tego czasu



Rys. 5. Most w Hasankeyf: a) widok na rzekę Tygrys z mostu w kierunku GW, b) pozostałości filarów mostowych od DW



Rys. 6. Rysunek mostu w Hasankeyf, widoki od DW: a) z boku, b) w planie (ryc. prof. Halil Gorgun, Dicle Üniversitesi)

most był w trwałej ruinie, [8] (Szymgin, 1997). Most był uważany za największy w okresie średniowiecza.

Współcześnie most miał w sobie ciekawostkę. Lewy filar był

na tyle w dobrym stanie, że został zamieszkały. Lokator zamontował współczesne bojery słoneczne, na poziomie pomostu dysponował pokojem/pokojami i co było postrzegane jako rodzaj ekscentryzmu – miał taras z bezpośrednim dostępem do rzeki i jeden z najpiękniejszych widoków na starożytną zabudowę na świecie (rys. 7).
Na długo przed rozpoczęciem budowy tamy w Turcji pojawiły się krytyczne wypowiedzi i publikacje dotyczące lokalizacji tamy. Wskazywano, że teren sąsiadujący z Hasankeyf jest bardzo ważnym obszarem dziedzictwa cywilizacyjnego, jakim jest Mezopotamia.



Rys. 7. Ruiny skrajnego lewego przęsła mostu w Hasankeyf: a) rok 2013, b) rusztowania, rok 2015



Rys. 8. Most w Hasankef, rok 2020: a) zabezpieczone ruiny podpór mostowych, b) piętrzenie wody na zaporze (foto: Alan Taylor, <https://www.theatlantic.com/photo/2020/10/photos-an-ancient-town-submerged-hasankef-underwater/616562/>)

Mimo determinacji władz tureckich, działania różnych środowisk, w tym inżynierskich, doprowadziły do kompromisu, polegającego na przyjęciu niższego poziomu piętrzenia wód rzeki Tygrys. W 2006 roku rozpoczęto prace przy budowie infrastruktury drogowej, tamy i nowego miasteczka dla mieszkańców Hasankef. Piętrzenie nastąpiło w sierpniu 2020 roku. Wezbrane wody zalały współczesny drogowy most żelbetowy oraz filary zabytkowego starożytnego mostu.

W Turcji istnieje program rewitalizacji zabytkowych mostów. Także i tu zastosowano racjonalne postępowanie ochrony cennych pozostałości mostu. Przed zalaniem zrujnowane podpory zostały obudowane/zabezpieczone płaszczami betonowymi dla, co by to nie znaczyło, przyszłych pokoleń. Oś zalewanych podpór mostu podkreślono czerwoną linią (rys. 8.b).

Jak już wspomniano, most nie jest w Polsce szerzej znany, co nie znaczy, że nie ma o nim interesujących opracowań, zainteresowanym poleca się dwa artykuły, uznane przez autorów za ważne: [9] (Young, , et al., 2000) oraz [10] (Drazewska, 2018).

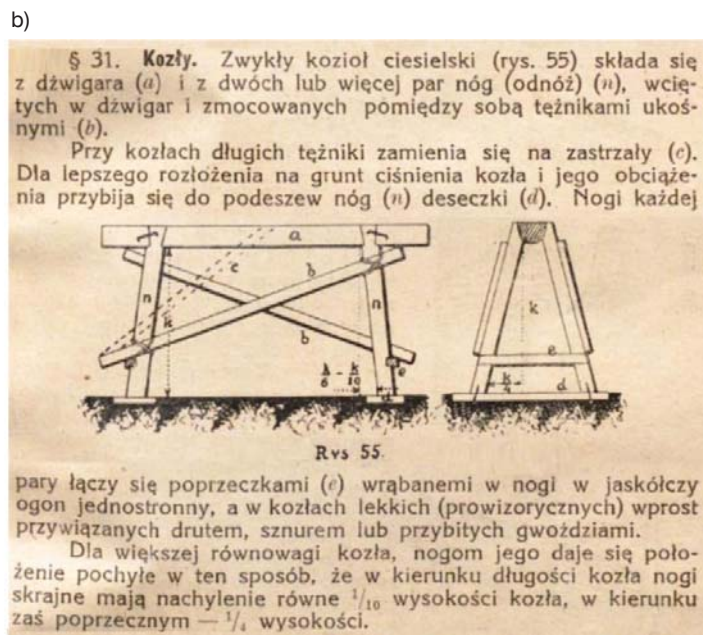
Krótki wstęp o antycznych mostach zakończmy już nie antycznymi, ale technicznie ważnymi mostami nad rzeką Berezyną z czasów Napoleońskich. W listopadzie 1812 roku, podczas odwrotu Wielkiej Armii w okolicach Borysławia i wsi Studzianka na Białorusi, Napoleon zaplanował przeprawę przez rzekę, która w zwykłych warunkach była podobna do rzeki Bystrzyca przepływającej przez Lublin. Odwilż sprawiła, że teren stał się podmokły i rzeczywista szerokość rzeki osiągała 100 m. W tych trudnych warunkach pięciuset francuskich i polskich saperów-pontonierów zbudowało dwa mosty kozłowe. Jako budulec wykorzystano drewno z rozbiórek domostw z okolicznych wsi. Pomosty opierały się na 23 kozłach o szerokości 4,5 m każdy oraz o wysokości 3 m. Po wybudowanych mostach przeszło około 47 tysięcy żołnierzy. Łącznie we wznoszeniu mostów i ich utrzymaniu brało udział około 100 polskich saperów-pontonierów z dywizji gen. Jana Henryka Dąbrowskiego, [11] (Stańczyk, 2013), [12] (Milecki A.).

W tym samym rejonie rzek Dźwina i Berezyna (linia Berezyny) miała również miejsce inna ważna bitwa wojny polsko-

§ 7. Słupy albo nogi (odnoża) kozłowe, tworzące podpory, i t. p. części wspierające się dolnym końcem na podwalny i inne twarde fundamenty, powinny mieć wymiary nie mniejsze od wskazanych poniżej w tablicy 4.

TABLICA 4.

| Długość przęsła najwyżej | Dla przejścia wszelkich rodzaj. wojsk i wozów o ciężarze 2,5 tonn | | | Dla przejścia wozów o ciężarze do 5—7 tonn | | | Dla samochodów z ciśnieniem na oś do 6 tonn | | |
|--------------------------|---|----|----|--|----|----|---|----|----|
| | Przy wysokości pomostu nad dnem rzeki lub rowu najwyżej: | | | | | | | | |
| | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| | metry | | | | | | | | |
| | średnica słupa lub odnoża w centymetrach | | | | | | | | |
| m. | | | | | | | | | |
| 2 | 8 | 9 | 10 | 9 | 10 | 11 | 11 | 13 | 14 |
| 3 | 9 | 10 | 11 | 9 | 10 | 11 | 11 | 13 | 14 |
| 4 | 10 | 11 | 13 | 10 | 11 | 13 | 11 | 13 | 14 |
| 5 | 10 | 13 | 13 | 10 | 13 | 13 | 13 | 14 | 15 |
| 6 | 11 | 13 | 14 | 11 | 13 | 14 | 13 | 14 | 15 |
| 7 | 11 | 13 | 15 | 11 | 13 | 15 | 13 | 14 | 15 |
| 8 | 13 | 14 | 15 | 13 | 14 | 15 | 13 | 15 | 17 |



Rys. 9. Mosty kozłowe [14]: a) tablica doboru elementów drewnianych, b) opis i rysunek kozła mostowego

-bolszewickiej. W maju-czerwcu 1920 roku oddziały polskiej 1. i 4. Armii spowołniły marsz Tuchaczewskiego na Warszawę, [13], (Davies, 2020).

Szczegółowy opis mostów koźlowych można znaleźć w książce/instrukcji [14] (Opracowane ..., 1920), (rys. 15.a). Spośród wielu opcji budowy mostów na koźlach cytuje się tylko dwa fragmenty dające możliwość *szybkiego budowania przeprawy dla pieszych, rowerzystów, pojazdów konnych, haubic* (rys. 9).

Rysunek 9 jest także klamrą spinającą technologię mostów drewnianych na przestrzeni wieków. Podobieństwo mostów nad rzeką Berezyną do mostu Cezara przez Ren (rys. 2) jest czytelne.

Maksymilian Thullie i jego biblioteka podręczników mostowych

Pierwszą polską Katedrę Mostów (na terenach zaborowych) utworzył na Politechnice Lwowskiej prof. Karol Ski-biński, jednakże potem przez bardzo długi czas kierował nią prof. Maksymilian Thullie. Thullie był także silnie związany z Politechniką Wiedeńską. Jego lista osiągnięć naukowych jest imponująca. Był dwukrotnie rektorem Politechniki Lwowskiej. Działal też na trudnym polu polityki z różnym skutkiem,

znana jest anegdota *rzutu kaloszem* [15]. Był senatorem RP. Do końca życia był czynny zawodowo, często przywoływany jako autorytet rozstrzygający problemy powstającej teorii żelbetu. Jego koncepcja rozkładu naprężeń/sił w trzeciej fazie pracy belki żelbetowej była ogólnie znana jako *Die dritte Phase* [16] (Thullie, 1913). We Lwowie w roku 1894, tuż przy Gmachu Głównym Politechniki Lwowskiej, została wybudowana żelbetowa delikatna parkowa kładka dla pieszych, zaprojektowana przez Thulliego.

Nie hierarchizując osiągnięć Thulliego, autorzy artykułu uznają jako pionierskie, technicznie uporządkowane i edukacyjnie podstawowe działanie polegające na opublikowaniu w języku polskim siedemnastu podręczników z zakresu teorii i projektowania mostów. Przegląd publikacji Thulliego, obejmujący 220 pozycji, można znaleźć w *Księdze pamiątkowej ku uczczeniu zasług doktora honoris causa profesora Maksymiliana Thulliego*. *Księga* została wydana staraniem Wydziału Inżynierji Lądowej i Wodnej Politechniki Lwowskiej i Polskiego Towarzystwa Politechnicznego [17], (repozytorium.biblos.pk).

Na Politechnice Lwowskiej początkiem kariery było skierowanie na studia matematyczno-mechaniczne na uczelniach we Wiedniu lub w Berlinie. W przedmiotach inżynierskich warunkiem koniecznym i dostatecznym była znajomość mechaniki. Pewnie dlatego pierwsze prace Thulliego obejmują



Rys. 10. Strony tytułowe książek Thulliego wydanych w latach: a) 1904, b) 1908, c) 1895, d) 1901, e) 1891, f) 1902, g) 1898, h) 1898

mowały ten właśnie zakres – O krzywych influencyjnych [18] [Thullie, 1878], Linie influencyjne [19] [Thullie, 1879], Teorya mostów [20] [Thullie, 1885], Podręcznik teorii mostów, tom I [21] [Thullie, 1890], Podręcznik teorii mostów, tom II [22] [Thullie, 1892]. Z racji tematyki niniejszego artykułu na rysunku 10, zamieszczono strony tytułowe książek dotyczące mostów drewnianych.

Podręczniki były wielokrotnie wznawiane, przy niewielkich zmianach treści. Jako przykłady rozwiązań technicznych, w atlasach rysunkowych, zamieszczano projekty mostów z cesarstwa Austriackiego, Niemiec, Francji, a nawet z Australii. Kompletność opracowań dotyczących mostów drewnianych została, w jakimś sensie, udowodniona wielokrotnym naśladowaniem fragmentów ich treści w zakresie obrazów/rysunków i sposobów obliczeń w opracowaniach tak świetnych inżynierów jak prof. prof. Stefan Bryła [23] (Bryła, 1927), Andrzej Przenicki [24] (Psenicki, 1938), Bogumił Hummel [25] (Hummel, 1952) oraz Dobrosław Strożecki [26] (Strożecki, 1959).

§. 36. Belki ciągłe z siodełkami.

Jeżeli przypuścimy podpory zwykłej belki ciągłej wszystkie dokładnie leżące w należytej wysokości, to linia największych momentów bez względu na znak przedstawi się nam według t. 28. r. 5 a (linia kreskowana*). Jeżeli więc belkę obliczymy według *najw* ($-M$) na podporach, to przy belce dwuprzęsłowej nie nie zyskujemy, bo *najw* ($-M$) = $-\frac{1}{8}ql^2$, przy trzyprzędłowej i więcejprzędłowej moment jest mniejszy około 8%. Jeżeli średnie podpory zniżymy (r. 5 b), to *najw* ($-M$) jeszcze się zmniejszy, *najw* ($+M$) powiększy**) i możemy przy stosownem zniżeniu uzyskać oszczędność 14 do 20%.

Dla przekroju stałego i podparcia takiego, że przeto nie powstają żadne styczne natężenia, otrzymamy następane najw. momenty podporowe M_1 i momenty dodatnie M , względnie M' , jeżeli nazwiemy l_1 i l rozpiętości przęseł skrajnych i średnich i $l_1 = \xi l$.

1. Dwa przęśla:

$$-M_1 = 0.125 ql^2, \quad M = 0.0703 gl^2 + 0.0957 pl^2 \quad . . \quad 56)$$

2. Trzy przęśla:

W przybliżeniu otrzymamy (dla $\xi = 0.9$)

$$\left. \begin{aligned} -M_1 &= -0.090 gl^2 + 0.051 p l_1^2 + 0.052 pl^2 \\ \text{przędło skrajne } +M &= 0.08 gl^2 + 0.094 p l_1 l_1^2 \\ \text{„ } \text{średnie } +M' &= 0.035 gl^2 + 0.073 pl^2 \end{aligned} \right\} 57)$$

Wzory te oparte są na przypuszczeniu, że przekrój jest stały. Jeżeli użyjemy siodełek, przekrój staje się zmienny, przez co momenty na podporach stają się większe, momenty dodatnie zaś się zmniejszają. *Winkler* obliczył, że dla długości a siodełek po obu stronach podpory $= 0.1 l$, momenty ujemne pomnożyć należy dla siodełek śrubowanych i dwóch przęseł przez 1.13, dla trzech przęseł przez 1.03, a dla siodełek klinowanych przez 1.25, względnie 1.15. Wskutek nierówno wysokich podpór zwiększenie to M_1 jest zwykle w praktyce mniejsze i wynosi około 10%. Momenty dodatnie zmniejszają się w przęśle skrajnym o 0.4 zwiększenia M_1 , a w przęślach środkowych o zwiększenie M_2, M_3 itd.

Używamy albo samych tylko siodełek, albo też podpartyeh zastrzałami (n. *das Kopfband*, fr. *l'aisselier*, *l'épaule*, *le lien en aisselle*, an. *the strut*, *the shoulder-tree*) (t. 28. r. 1) dla większych rozpiętości dla mostów kolejowych do 8m, dla drogowych do 14m.

Siodełko

Obecnie książki Thulliego mają dodatkowy walor, jakim jest piękna i precyzyjna polszczyzna języka technicznego z tamtych lat. Z tego powodu poniżej zamieszczono skany fragmentu tekstu dotyczącego siodełek mostowych, [27] (Thullie M., 1895).

W cytowanym tekście zastosowano oznaczenia: M_1 – moment zginający nad jarzmem, M – momenty przęsłowe, M' – moment przęsłowy w przęśle skrajnym gdy $\xi = 0,9$.

Obliczenie długości siodełka

W książce Thulliego [27] (Thullie, 1895) znajdujemy definicję mostu leżajowego, co jest obecnie nadzwyczajne dlatego, że w Słowniku Języka Polskiego PWN takiego terminu nie ma.

Mostami leżajowymi (n. *die einfache Balkenbrücke*) nazywamy takie mosty, których belki główne składają się z pojedynczych belek, jedna obok drugiej leżących.

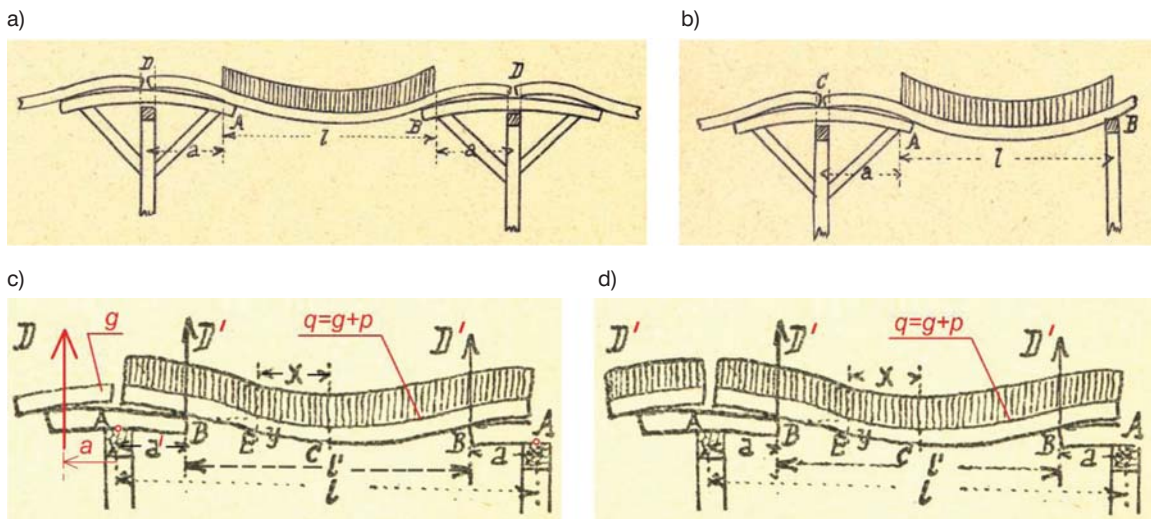
Ponieważ ustrój tych mostów jest nadzwyczaj prosty, więc używane są one bardzo często dla małych rozpiętości.

W przypadku mostów leżajowych, dążąc do wydłużenia przęśla lub zwiększenia sztywności belek pomostu stosowano belki wielokrotnie zespolone łącznikami, dodatkowo nad jarzmami stosowano *siodełka* lub siodełka z zastrzałami. Na rysunku 11 zamieszczono skany rysunków z książki [28] (Thullie M., 1913. Rysunki 11.a–b ilustrują mechanizm deformacji belek głównych uciążlonych w interakcji z belką siodełka w dwóch wariantach – jarzm pośrednich i jarzma z słupem przyczółka. Większość mostów w książkach Thulliego to obiekty kolejowe, które mają przyczółki kamienne, dlatego wariant rysunku 11.b nie jest zalecany. Przy czym zamieszczono go prawdopodobnie ze względu na mosty drogowe. Rysunki 11.c–d to schematy służące do obliczania siodełka. Mimo tego że rysunki mogą być na sąsiadujących stronach, oznaczenia na rysunkach mogą być niejednolite. Z tego powodu na rysunkach 11.c–d pojawiły się dodatkowe opisy w kolorze czerwonym. Podobnie rzecz się ma w monografii Strożeckiego, która jest bliższa współczesności.

W analizowanej książce Thulliego i w uzupełniającym tekst książki *Atlasie rysunków*, nie są wyraźnie sformułowane założenia, co do mechaniki siodełka, dlatego przypomina się, że:

- zagadnienie jest liniowo sprężyste, czyli że deformacje są odwracalne,
- obowiązuje zasada zeszywnienia, którą najkrócej, ale przy zachowaniu jej poprawności, wyrażamy zdaniem – *konfiguracja zdeformowana jest zbieżna z konfiguracją początkową*,
- stosowane są zasady wytrzymałości materiałów i mechaniki budowli,
- zakłada się, że odkształcenia są małe, czyli że tensor odkształceń jest liniowy,
- elementy (belki, słupy, zastrzały) drewniane są jednorodnie i izotropowe, można je utożsamiać z ich osiami,
- pomijamy jest ciężar własny belki siodełka.

Rys. 11. Siodełko nad jarzmem: a) konfiguracja po deformacji z symbolicznym obciążeniem belki przęsła pośredniego z zastrzałami, b) wariant jarzma przyskrajnego ze skrajnym słupem przyczółka bez siodełka, c) schemat obciążenia i oznaczenia do analizy siodełka przy wariacie obciążenia tylko belki przęsłowej pośredniej, bez zastrzałów, d) jak w przypadku (c) jednakże przy obciążeniu ciężarem własnym i ciężarem użytkowym ($g+p=q$) na belce pośredniej i belkach sąsiadujących



Stosuje się oznaczenia zamieszczone na rysunkach 11.c–d.

Uwaga! Z przyczyn edytorskich, odchodząc od oznaczeń oryginalnych, zamiast stosowania małego l będzie stosowane duże L .

W przywołanej książce Thulliego rozwiązanie problemu siodełka ma formę opisową, tzn. że wzory są podawane w treści. Zważając na to, że problem siodełka jest analitycznie fascynujący, zamieszcza się go, w formie zbliżonej do współczesnego zapisu, zastosowanego w książce [26] (Strożeczki, 1959). Analiza dotyczy dwóch wariantów.

Wariant I – Rysunek 11.c

W celu przejrzystości analizy i osiągnięcia stanu ekstremalnego wyężenia i deformacji pomija się łączniki między belką i siodełkiem. Uwzględnia się pojedynczą belkę w przęśle pośrednim oraz pojedyncze belki sąsiadujące po obu stronach rozpatrywanego przęsła, [26] (Strożeczki, 1959). Przedmiotowa belka pośrednia jest obciążona ciężarem własnym i ciężarami użytkowymi $q = g + p$, podczas gdy belki sąsiadujące są obciążone tylko ciężarem własnym g . Po deformacji układu siodełko-belka pośrednia, ich styk wystąpi w miejscu wspólnej stycznej zgiętej belki i zgiętego siodełka. Z tak zdefiniowanej konfiguracji aktualnej wyznacza się maksymalny moment zginający belkę pośrednią.

Bazując na rysunkach deformacji oraz stosując wprowadzone oznaczenia możemy napisać

$$L' = L - 2a', \quad D = \frac{g}{2}L, \quad D' = \frac{q}{2}L. \quad (1.1-3)$$

Stan równowagi momentów w siodełku wyraża związek, z którego otrzymujemy

$$Da = D'a', \quad \text{gdzie} \quad a' = a \frac{g}{g+p}, \quad L' = L - 2a \frac{g}{q}. \quad (2.1-3)$$

Maksymalny moment zginający w siodełku względem punktu A wynosi

$$M_A^{(I)} = D'a' = g \frac{L}{2} a. \quad (3)$$

W przęśle pośrednim wartość momentu zginającego w belce względem punktu C ma postać

$$M_C^{(I)} = D' \left(\frac{L}{2} - a' \right) - q \frac{L^2}{8} = \frac{L}{8} (qL - 4ga). \quad (4)$$

Znając momenty zginające i w konsekwencji wywoływane naprężenia normalne można projektować belki siodełka i przęsła. W takim sensie wyznaczone maksymalne wartości momentów zginających mogą być interpretowane jako podstawa do stanu granicznego nośności (ULS). Jednakże do projektowania konstrukcji wykorzystuje się schemat statyczny rysunku 11.d, który prowadzi do największych wyężeń i dlatego jest miarodajny.

Wariant II – Rysunek 11.d

Stała wartość obciążenia liniowego q skutkuje równościami

$$a' = a, \quad D' = D, \quad (5.1-2)$$

w konsekwencji wzory ulegają uproszczeniom. Maksymalny moment zginający w siodełku wynosi

$$M_A^{(II)} = Da = \frac{q}{2} a, \quad (6)$$

podczas gdy równanie momentu zginającego w siodełku ma postać

$$M_A^{(II)}(x) = D(a - x) = \frac{q}{2} L(a - x). \quad (7)$$

Odpowiednio w belce przęsłowej mamy następującą maksymalną wartość momentu

$$M_C^{(II)} = \frac{DL'}{2} - \frac{qL^2}{8} = \frac{qL}{8} (L - 4a), \quad (8)$$

oraz równanie momentu w postaci

$$M_C^{(II)}(x) = D \left(\frac{L'}{2} - x \right) - \frac{q}{2} \left(\frac{L'}{2} - x \right) = \frac{q}{8} (L^2 - 4(La + x^2)). \quad (9)$$

Równania momentów zginających są wykorzystywane do sformułowania warunku zgodności deformacji wyraża-

jącego konieczność wspólnej stycznej w miejscu kontaktu zakrzywionych zginaniem siodelka i belki przęsłowej. W tym przypadku warunek zgodności deformacji ma znamiona z zakresu stanu granicznego użyteczności (SLS).

Równanie różniczkowe osi odkształconej siodelka wyraża również zmienność krzywizny belki siodelka w funkcji zmienności momentu zginającego, jest zatem

$$\varphi'_s = \frac{M_A^{(m)}(x)}{EJ_s} = \frac{qL}{2EJ_s} (a-x), \quad (10)$$

gdzie φ'_s – oznacza krzywiznę belki siodelka, przy czym φ_s jest kątem obrotu osi belki siodelka, E – jest modułem odkształcalności liniowej drewna wzdłuż jego włókien, J_s – oznacza główny moment bezwładności pola przekroju poprzecznego belki siodelka.

Wykonując na równaniu (10) całkę nieoznaczoną otrzymamy wyrażenie na zmienność stycznej do siodelka

$$\begin{aligned} \varphi_s &= C_1 + \frac{1}{EJ_s} \int M_A^{(m)}(x) dx = C_1 + \frac{qL}{2EJ_s} \int (a-x) dx = \\ &= C_1 + \frac{qL}{2EJ_s} \left(ax - \frac{x^2}{2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

przy czym na zasadzie symetrii deformacji siodelka wartość stałej całkowania $C_1 = 0$.

Powtarzając powyższy schemat w przypadku równania momentów zginających belkę pośrednią $M_C^{(m)}(x)$ otrzymujemy

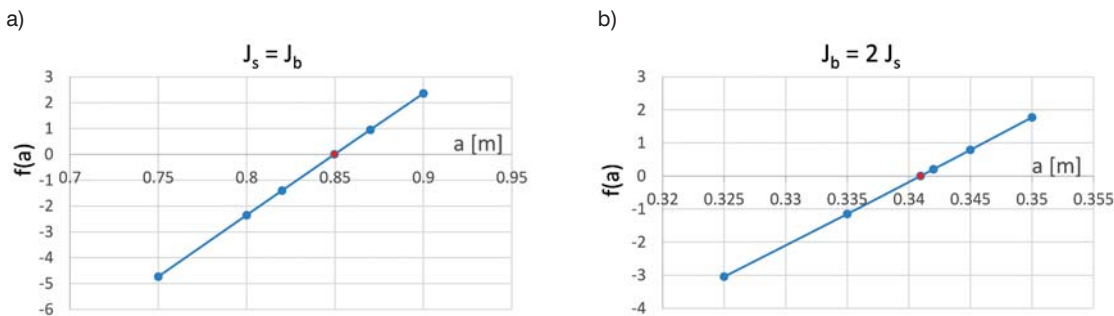
$$\begin{aligned} \varphi_b &= C_2 + \frac{1}{EJ_b} \int M_C^{(m)}(x) dx = C_2 + \frac{1}{EJ_b} \frac{q}{8} \int (L^2 - 4(La + x^2)) dx = \\ &= C_2 + \frac{1}{EJ_b} \frac{q}{8} \left(L^2 x - 4 \left(La x + \frac{x^3}{3} \right) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Również w tym przypadku $C_2 = 0$.

Warunek zgodności deformacji ma postać

$$\varphi_s = \varphi_b \text{ lub } f(a) = \varphi_s - \varphi_b. \quad (13)$$

Funkcja $f(a)$ jest wielomianem trzeciego stopnia względem x . Opcjonalnie rozwiązanie można uzyskać przy stosowaniu metody *Cardano*, które może mieć jeden albo trzy pierwiastki rzeczywiste, co mogło prowadzić do nadmiernej złożoności rachunków. Z tego powodu problem był rozwiązywany iteracyjnie przez przyjmowanie kolejnych ustalonych wartości a oraz minimalizowaniu funkcji $f(a) = \varphi_s - \varphi_b \rightarrow 0$ do umownie dostatecznie małej wartości bliskiej zeru.



Rys. 12. Wyniki iteracji: a) siodelko i belka o jednakowym przekroju poprzecznym, b) belka z siodelkiem o podwójnej wysokości

Na rysunku 12 przedstawiono wyniki iteracji w dwóch przypadkach przy założeniu, że $J_s = J_b$ oraz $J_b = 2J_s$. Dodatkowo do obliczeń założono, że belki drewniane mają przekrój kwadratowy o boku 25 cm, co prowadzi do $J_s = \frac{0,25^4}{12} \text{ m}^4$ oraz $J_b = \frac{0,25 \cdot 0,5^3}{12} \text{ m}^4$, długość belki pośredniej wynosi $L = 5 \text{ m}$.

Nawet z tego prostego warunku uzyskano ważny wniosek, że w przypadku relatywnie wiotkiej belki długość belki siodelka jest znacznie większa niż w przypadku belki wysokiej.

Thullie zaleca, by obliczoną długość powiększyć o nadładki na końcach równe co do długości wysokości belki siodelka. Jednocześnie wskazuje, że długość belki siodelka nie powinna być większa niż 3,2 m.

Na zakończenie tego podrozdziału należy zadać pytanie, dlaczego w Wariancie I nie przeprowadzono podobnej analizy?

Zdaniem autorów przyczyną jest trudność w rozpoznaniu warunku do wyznaczenia stałych całkowania. Deformacja siodelka jest asymetryczna, można ją aproksymować sumą stanu symetrycznego i antysymetrycznego, ale to może tylko w niewielkim stopniu uprościć sposób rozwiązania i na dodatek to nie będzie warunek ścisły. Na szczęście silniejszym mechanicznie wariantem jest Wariant II.

Zastrzał

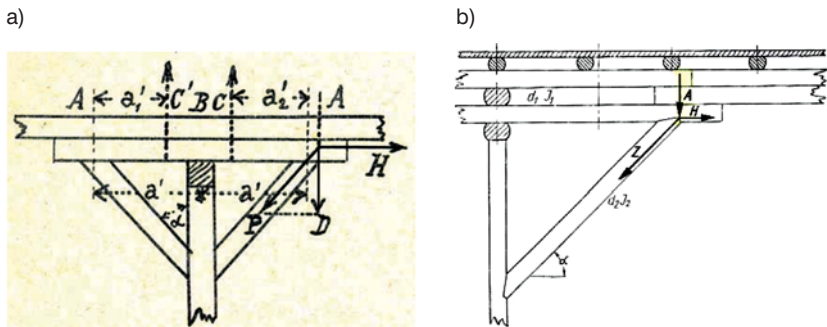
To jest oczywiste, że o wiele wydajniejsze w sensie mechanicznym od pojedynczej belki siodelka jest siodelko z zastrzałami. Jednakże jego sposób obliczania był złożony. Największe trudności nastręczały założenia, które mimo że finalnie proste, mogły prowadzić do różnych rezultatów. W przypadku potencjalnych różnych modeli obliczeniowych ostatecznie ich weryfikacja przez praktykę była decydująca. Jako przykład możliwych różnych założeń zamieszczono na rysunku 13 dwa różne schematy obliczeniowe. Rysunek 13.a zaczerpnięto z książki Thulliego, podczas gdy rysunek 13.b jest skanem z książki Strożeckiego.

Trudność polega na tym, żeby ustalić rozdział oddziaływania siły pionowej na siodelko i zastrzał.

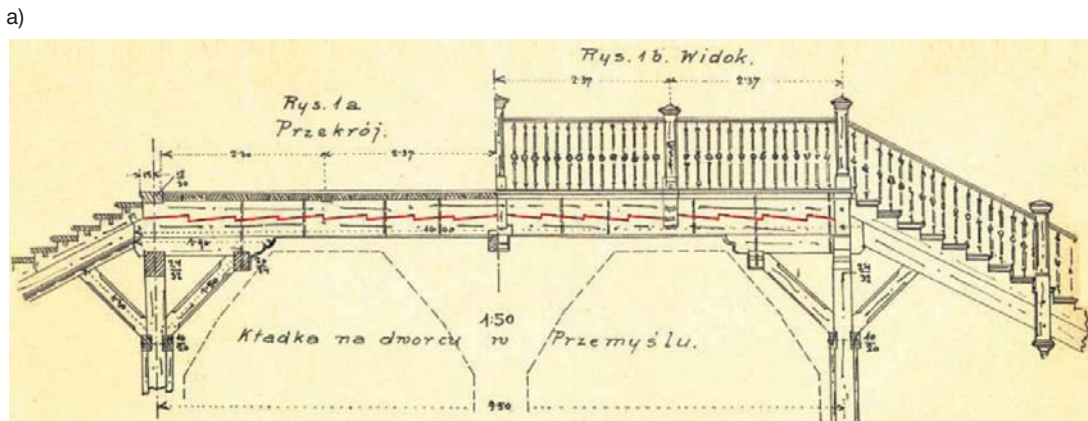
Zagadnienie jest hiperstatyczne o jednym stopniu. Współcześnie zagadnienie to odpowiada np. belce sztywnej wzmocnionej wiotką kratownicą. Jednakże obecnie dysponujemy komputerami z odpowiednimi procedurami numerycznymi i to jest zupełnie inny świat niż

czas Thulliego czy Strożeckiego.

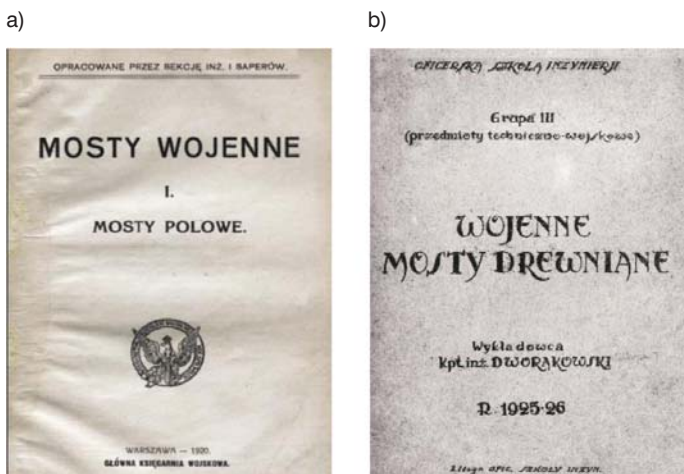
Strożecki do rozwiązania problemu wykorzystał pracę odkształcenia uwzględniając momenty zginające w siodelku i zastrzale. Mógł tak zrobić dzięki przyjętemu założeniu o mi



Rys. 13. Sily uwzględniane przy obliczaniu siodełka: a) siła P w zastrzale wg Thulliego, b) siła Z w zastrzale wg Strożeckiego



Rys. 14. Schematy ciągłe belek złożonych nad jarzmem: a) widok z boku i przekrój podłużny kładki z ustrojem nośnym z dwóch belek zespolonych zaciosami w Przemysłu, b) (2a) wykres momentów ujemnych, (2b) belka podwójna, układ symetryczny, c) (2c) belka potrójna, układ symetryczny, (2d) belka potrójna, układ asymetryczny z przesunięciem belki środkowej



hydrauliki przepływu wód niewiele się różnią od współczesnej wiedzy, omówione były obciążenia mostów. Opis matematyczno-mechaniczny jest na bardzo wysokim poziomie, język opracowań jest precyzyjny i elegancki.

Książki Thulliego, ale także innych przywoływanych tu autorów, ze względu na złożoność tematyki, nie mogły być studiowane powszechnie. Istniała także literatura wykonawcza zawierająca informacje pozwalające budować mosty według typowych projektów. Przykładem jest książka kpt. inż. Dworakowskiego (rys. 15.b), [29] (Dworakowski, 1925–1926),

Rys. 15. Mosty wojenne: a) opracowanie przez sekcję inżynierów i saperów, rok wydania 1920, b) Dworakowski, rok 1926

a)



b)



Rys. 16. Most w ciągu u. Pawiej w Lublinie: a) budowa pomostu, b) kształtowanie skarp i skrzydeł przyczółków (foto: Teatr NN w Lublinie)

która, jak się może wydawać, powstała przez pominięcie w monografii Thulliego wszystkich matematycznych fragmentów. To była dobra książka, jednakże adresowana do innych odbiorców.

Informacje w niej zawarte mogły posłużyć do projektowania mostów takich jak ten pokazany na rysunku 16, który wybudowano w ciągu ul. Pawiej w Lublinie w roku 1940. Służył do roku 1961.

Więcej o drewnianych mostach w Lublinie można przeczytać w książce dra Macieja Kowala [30] (Kowal, 2019).

Bibliografia

- [1] Gąsowski T., Ronikier J., Wróbel P., Zblewski Z., (1999/2002), *Bitwy polskie*. Leksykon, Znak, s. 220
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Timber_bridge
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Holzbr%C3%BCcke>
- [4] Andrea Palladio, (1570/1955), *I quattro libri dell'architettura*, 1570, Venice, p. 339; *Cztery księgi o architekturze*, PWN
- [5] Cezar J., (1978), *Wojna galijska (Bellum Gallicum)*, Ossolineum, s. 374
- [6] Kelsey F., (1918), ed.: *Caesar's commentaries: The Gallic War*, Books I-IV, with Selections from Books V-VII and from the Civil War, Boston, s. 674
- [7] Marcus Vitruvius Pollio (~1470), *De architectura libri decem*, rękopis, dostęp: <http://rightsstatements.org/vocab/InC/1.0/>
- [8] Szmygin B., (1997), *Trwała ruina: granice i uwarunkowania działań konserwatorskich na przykładzie zamku w Janowcu nad Wisłą*, *Ochrona Zabytków* 50/1, 12-18, s. 12-17
- [9] Young P., (2000), *Hasankeyf: A City in Peril*, "History Today" Vol. 50(11)
- [10] Drazewska B., (2018), *Hasankeyf, the Ilisu Dam, and the Existence of "Common European Standards" on Cultural Heritage Protection*, 89 *Santander Art and Culture Law Review*, p. 89-120; DOI: 10.4467/2450050XSNR.18.020.10374.
- [11] Stańczyk A., (2013), *Mosty przez Berezynę*, „*Drogownictwo*” 6/2013, s. 193-195
- [12] Milecki A., *Monografie kampanii napoleońskich: Mosty w dobie wojen napoleońskich*, dostęp: <https://napoleon.org.pl/>
- [13] Davies N., (2020), *Orzeł biały, czerwona gwiazda. Wojna polsko-bolszewicka 1919–1920*, Znak, s. 360
- [14] Opracowane przez sekcję inż. i saperów, (1920), *Mosty wojenne Część I, Mosty polowe*, Główna Księgarnia Wojskowa, Warszawa, s. 75; dostęp: polona.pl/item/94257131
- [15] <https://mail.pk.edu.pl/~naszapol/np40/sawicki.shtml>
- [16] Thullie M., (1913), *Die dritte Phase der gehageten Eisenbetonträger*, *Zeitschrift d. österr. Ing. u. Arch. Vereins*, Wien
- [17] https://repozytorium.biblos.pk.edu.pl/redeo/resources/2221/file/scans/DEFAULT/OCRrezultat/100000233976_A_v1_200dpi_q60.pdf
- [18] Thullie M., (1878), *O krzywych influencyjnych i ich zastosowaniu do wyznaczania graficznego sił, działających w zwykłej belce kratowej*, Dzwignia, Lwów
- [19] Thullie M., *Linje influencyjne dla mostów łukowych o trzech zawiasach*, (1879), Dzwignia, Lwów
- [20] Thullie M., *Teoria mostów*, autografja, (1885), Lwów
- [21] Thullie M., (1890), *Podręcznik teorii mostów*, Cz. I., tom I., wyd. I., Lwów
- [22] Thullie M., (1892), *Podręcznik teorii mostów*, Cz. I, tom II, wyd. I., Lwów
- [23] Bryła, S. W., (1927), *Mosty drewniane*, Lwów i Warszawa, s. 72
- [24] Pszenicki Andrzej, (1938), *Kurs budowy mostów*, Warszawa, s. 460
- [25] Hummel B., (1952), *Mosty mniejsze drewniane*, PWN, Poznań, ilustracje 28, s. 54
- [26] Strożeczki D., (1959), *Mosty drewniane*, Warszawa, s. 310
- [27] Thullie M., (1895), *Mosty belkowe i jarzma*. A. Tekst, s. 107; dostęp: repozytorium.biblos.pk.edu.pl/resources/2153
- [28] Thullie M., (1913), *Mosty drewniane. Mosty belkowe i jarzma*, Cz. I, B. Atlas, Lwów
- [29] Dworakowski M., (1925–1926), *Wojenne mosty drewniane*, Oficerska Szkoła Inżynierji, s. 434; dostęp: POLONA 888.714 A
- [30] Kowal M., (2019), *Dawne mosty Lublina nad rzeką Czechówką*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, s. 186