

FRANZ-DIETRICH SCHIEFERDECKER

Brückenbautechnische Überlegungen zur römischen Rheinbrücke bei Koblenz

Die 1980 durch das Landesamt für Denkmalpflege, Außenstelle Koblenz, in Zusammenarbeit mit dem Wasser- und Schiffsamt Bingen, Aufsichtsbezirk Koblenz, geborgenen Eichenpfähle aus dem Rhein bei Koblenz konnten auf Grund der günstigen Arbeitsmöglichkeiten, die der Taucherschacht bot, so exakt aufgemessen werden, daß sich der Grundriß von Brückenpfeilern ermitteln ließ (s. o. S. 290 Abb. 2). Für die Rekonstruktion des Brückenaufbaus bieten sich auf der Basis dieses Grundrisses verschiedene Lösungsmöglichkeiten an. Dabei kann von folgenden Voraussetzungen ausgegangen werden:

1. hohes handwerkliches Niveau
2. gute Kenntnisse der Baustoffe und Hilfsmittel
3. den Anforderungen perfekt angepaßte Werkzeuge
4. geringer Einsatz von Maschinen, dafür ein um so größerer von Arbeitskräften.

Über den damaligen Kenntnisstand an statischen Rechenformeln und Gebrauchsnormen ist uns dagegen nichts bekannt. Unter den genannten Voraussetzungen kommen für eine Überbrückung des Rheins mehrere Lösungen in Frage.

1. Der Pioniersteg

Im 1. Jahrhundert v. Chr. war bei Neuwied der Rhein von Caesar mit zwei Pionierstegen überbrückt worden¹. Sie sollten ermöglichen, zwei Legionen (12 000 Mann) schnell am feindlichen Ufer aufmarschieren zu lassen. Der Pioniersteg diente nur einer kurzfristigen militärischen Operation und in diesem Falle der Demonstration militärischer Stärke und Flexibilität. Die Stege wurden nach Beendigung der Operation abgebrochen, um sie dem Feind nicht in die Hände fallen zu lassen.

2. Die Pfahlrostbrücke

Zwei Brücken dieses Typs sind von H. Cüppers bereits ausführlich beschrieben². Bei der Pfahlrostbrücke wurden Pfähle dicht bei dicht und oft regellos in den Flußgrund geschlagen, die Zwi-

¹ Vgl. u. Mensching S. 333 ff. mit Abb. 4; 5.

² H. Cüppers, Die Trierer Römerbrücken. Trierer Grabungen u. Forsch. 5 (1969) 42 ff.; 145; 165 ff. – Vgl. auch u. Mensching S. 331 f. mit Abb. 2.

3. Die Schiffsbrücke

Die Schiffsbrücke erlaubte, sehr tiefe Flüsse zu überwinden, und war von wechselnden Wasserständen weitgehend unabhängig. Für die Erbauung benötigte man lediglich Boote, Ankerklötze und Ketten. Die Durchlässe einer Schiffsbrücke waren jedoch kaum höher als die Bordhöhe der eingebauten Kähne.

Eine Schiffsbrücke über den Rhein hätte daher den regen Lastenverkehr auf dem Fluß unmöglich gemacht, da die Durchlässe für Lastschiffe zu niedrig waren.

4. Die Pfahljochbrücke

Anders als bei der Pfahlrostbrücke waren bei der Pfahljochbrücke die Pfeiler offen. Das Wasser konnte hier auch zwischen den Pfählen des Joches hindurchgleiten, was den Widerstand verringerte³. Die Joche mußten so hoch wie möglich sein, damit die Schifffahrt auch bei hohem Wasserstand nicht behindert wurde. Die jährlichen Spitzenhochwasser durften die Fahrbahn nicht erfassen, da sonst der Andruck des Wassers um ein Mehrfaches angestiegen wäre. Hinzu kamen die Stoß- und Druckbelastungen durch Eisgang und Treibholz. Ein entscheidender Nachteil der Pfahljochbrücke war, daß die Pfähle in Höhe des Wasserspiegels einer stärkeren Verrottung unterlagen, da hier der Pilzbefall stärker ist als unterhalb der Wasserlinie. Wenig gepflegte hölzerne Schiffe mit immer gleicher Wasserlinie haben daher eine Lebensdauer von ca. 20 Jahren. Eine Pfahljochbrücke wird bei wechselnden Wasserständen nicht viel länger als 50 bis 100 Jahre bestanden haben.

Die aufgefundene Pfahlstellung der Koblenzer Brücke läßt auf eine Konstruktion als Pfahljochbrücke schließen. Für die Rekonstruktion sind zunächst die örtlichen Gegebenheiten zu berücksichtigen: Das Mittelwasser in Koblenz liegt bei 59,97 m über NN. Das sind $4\text{ m} \pm 0,20$ über heutigem Flußgrund im Bereich der Joche A, B, C (C_1), D, E, F. Die Hochwasserlinie liegt bei 64 m über NN. 1928 erreichte das maximale Hochwasser 66,93 m und 1955 66,28 m über NN. Wir dürfen für das 1. Jahrhundert n. Chr. annehmen, daß die Flußtäler unverbaut, voller Altwasser, Sümpfe und Flußschleifen gewesen sind und deshalb bei etwa gleichbleibender Jahresniederschlagshöhe aufnahmefähiger für örtliche und jahreszeitliche Spitzen waren. Die Extremwerte für Hoch- und Niedrigwasser sind folglich geringer anzusetzen (Abb. 1).

Für den Bereich der aufgefundenen Joche kann man annehmen, daß der damalige Flußgrund 1–1,5 m höher gelegen hat. Die Jochpfähle waren folglich um dieses Maß tiefer eingerammt als dies aus dem heutigen Befund ersichtlich ist. Die größere Einrammtiefe hat eine bessere Standsicherheit der Brücke zur Folge.

Nach den vorgefundenen Pfahlresten sind Eichenpfähle vorzüglicher Qualität ausgewählt worden. Zum Rammen eignen sich nur gerade gewachsene Stämme. Für die Jochkonstruktion sind Pfahlängen von 11–12 m notwendig. Die Handhabung dieser 1,5 t schweren Pfähle, ihr Einloten in den Flußgrund und nicht zuletzt die dadurch nötig gewordene Bauhöhe des Rammbockes erscheinen aus heutiger Sicht problematisch. Denn schon bei Mittelwasser von 4 m über Sohle stand der 12 m lange Pfahl fast 8 m hoch über einem Rammfloß. Dazu kamen der Rammweg von 1,50 m und die Höhe des Rammbaren. Diese gesamte 'Maschine', bestehend aus Floß und Bock, mußte von Pfahl zu Pfahl neu ausgerichtet werden. Die Pfahlspitzen waren ca. 1,30–2 m lang, rund, teils leicht ballig und deutlich mit der Axt zurechtgeschlagen. Man wußte also sehr wohl, daß man einen so beschaffenen Rammpfahl mit geringstem Widerstand in den Flußgrund einschieben konnte und den Untergrund dabei so wenig wie möglich verdrängte. Alle Pfähle hatten Pfahlschuhe. Sie sind meist beim Ziehen der Pfähle im Grunde steckengeblieben, aber durch Rostverfärbungen und Nagellöcher an den Pfahlspitzen nachzuweisen. Die Pfahlspitze war sehr genau mittig zugeschlagen, Au-

³ Vgl. Mensching u. S. 330 f. mit Abb. 1.

ßermittigkeit läßt den Pfahl beim Rammen auswandern und führt zum Pfahlbruch. In den Flügeln hatten die Pfahlschuhe Langlöcher, damit sich der Pfahl im 'Trichter' des Pfahlschuhs nachsetzen konnte. Die Lage der Eisenhütte, die für diese Baumaßnahme ca. 600–700 Pfahlschuhe in zweifellos vorgeplantem Zeitablauf zugeliefert hat, ist bis heute nicht bekannt. Immerhin wurden 60–70 Rennöfen benötigt, da die Öfen oft nur einmal, höchstens viermal gebraucht wurden und eine 'Ofenreise' nicht mehr als 15 kp (15 kg) Eisen, das sind 2, höchstens 3 Pfahlschuhe, erbringt⁴. Sie wurden aus gekreuzt mittig übereinandergelegten Eisenstäben bei hoher Schmiedehitze in ein spitzen 'Gesenk' geschlagen und dann an den Flügeln auf 40 cm ausgereckt.

Nach heutigen Anweisungen werden die Rammpfähle 'zopfrecht' und nicht 'waldrecht' eingeschlagen, d. h. der obere Teil des Baumes ist beim Einrammen nach unten zu richten. Der Flußgrund soll den rißgefährdeten Teil des Stammes zusammenzwingen. Im Stammfußbereich, wo der Rammbar auftritt, hat man einen Ring aufzuziehen oder einen pfannenartigen Rammtopf aufzusetzen, damit der Pfahl nicht 'aufbürstet'.

Bei der Koblenzer Brücke wurden die Pfähle dagegen 'waldrecht', mit dem Stammfuß nach unten, eingeschlagen. Ursache hierfür wird die große Länge der Pfähle sein, da sich der Durchmesser vom Stammfuß bis zum Zopf um ca. 20 cm verringert. Das 'waldrechte' Einrammen der Pfähle ist aus folgenden Gründen sinnvoll:

1. Der Pfahl hat am Flußgrund das größte Moment aufzunehmen;
2. der Pfahl ist der Länge wegen auf Knickung beansprucht, was durch Konizität nach oben gemildert wird;
3. das Bärgewicht ist klein im Verhältnis zum Pfahlgewicht, damit ist die Gefahr des 'Aufbürstens' auch bei geringerem Querschnitt des Kopfes gering.

Stämme von etwa 12 m Länge haben ca. 15 MN Gewicht, das sind 1,5 Mp (1,5 t). Zum Rammen genügt ein Bärgewicht von 4–7 kN (ca. 400–700 kp), das durch eine Mannschaft von bis zu 20 Mann auf eine Höhe von 1–1,2 m gezogen wird. Der Rammbar wird zwischen Schienen, den 'Mäklern', geführt. Er wird mit einem Seil, das über eine Rolle läuft und mit Griffhölzern in nachstellbarer Höhe versehen ist, in die entsprechende Höhe gehoben. Der Rammpfahl ist durch Führungszangen in den Flußgrund eingesenkt. Eine Flaschenzugübersetzung ist dabei nicht erforderlich. Geschlagen wird im Rhythmus, sei es auf Kommando, sei es im Takt eines Liedes. Nach 10 bis 20 Schlägen, das ist eine 'Hitze', muß gemessen werden. Normal zieht der Pfahl in einer Hitze anfangs 15 cm, zuletzt nur noch 2–4 cm. Wenn das Rammstück nicht mehr 'zieht', d. h. wenn die Pfahlspitze auf Widerstand stößt, 'tanzt' der Bär; u. U. muß man nebenan neu ansenkeln. So sind Unregelmäßigkeiten in der Pfahlsetzung zu erklären.

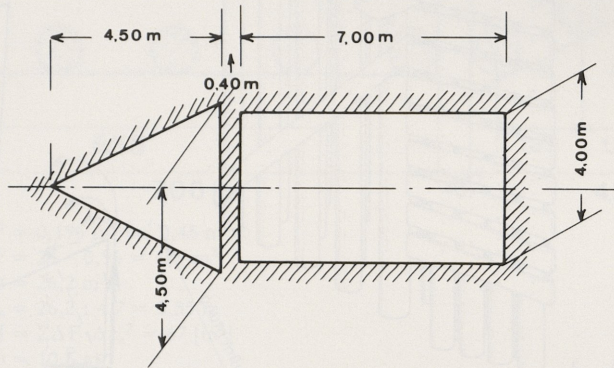
Das Floß bzw. der Rammbock mußte nach jedem eingerammten Pfahl neu ausgerichtet werden, sicher mit der Groma, dem Justier- und Richtgerät der Römer. Dieses Floß oder die Flöße, wenn man zugleich an mehreren Jochen arbeiten wollte, kann man sich durchaus sehr groß, mit U-förmigem Einschnitt in Größe und Umriß der Pfahljoch vorstellen. Je größer das Floß, desto weniger schwappt es beim Aufschlagen des Bärs auf den Pfahl hoch. So beachtlich die Handwerkskunst des Rammens ist, so ist doch die Organisation, das Bestimmen von einigen 100 geeigneten Bäumen, das Fällen, das Heranschaffen mit Zugtieren, das Sägen auf Länge, das Abbeilen, das Flößen, Anpassen, Überplatten und Verzapfen über 330 m Fluß hinweg die eigentliche erstaunliche Leistung.

Die Pfahljochkonstruktion

Die Pfähle standen senkrecht im Fluß; gewollte, systematische Abweichungen von der Senkrechten wurden nirgends festgestellt. Es fanden sich keine Spuren einer Packlage aus Steinen, so zweckmä-

⁴ B. Osann, Rennverfahren. Fachausschußber. 9001 VdeH Düsseldorf; H. Veters, Ferrum Noricum. Anz. Österr. Akad. Wiss. Phil.-Hist. Kl. 1966, 167 ff.

ßig dies auch gegen die Gefahr des Ausspülens erscheinen mag. Die Pfahlsetzungen der Joche A, B, C, D, E, F (vgl. oben S. 290 Abb. 2) sind in ihren Ausmaßen so ähnlich, daß sie in eine Schablone passen (Abb. 2). Einem Rechteck, im lichten Maß 4 m breit und 7 m lang, ist an einer Schmalseite ein gleichschenkliges Dreieck vorgelagert (lichte Höhe 4,5 m und Basislänge 4,5 m). Diese Schablone paßt mit hinreichender Genauigkeit über alle Joche. Dabei fällt auf, daß die Pfähle innerhalb des Rechtecks, je 5 in 3 Reihen, sauber gesetzt sind, besonders an den Längsseiten. Dichter, aber weit weniger exakt, stehen die Pfähle im Dreieck, das gegen die Strömung gerichtet ist.



2 Koblenz, Rheinbrücke. Balkenrahmen als 'Jochschablone'.

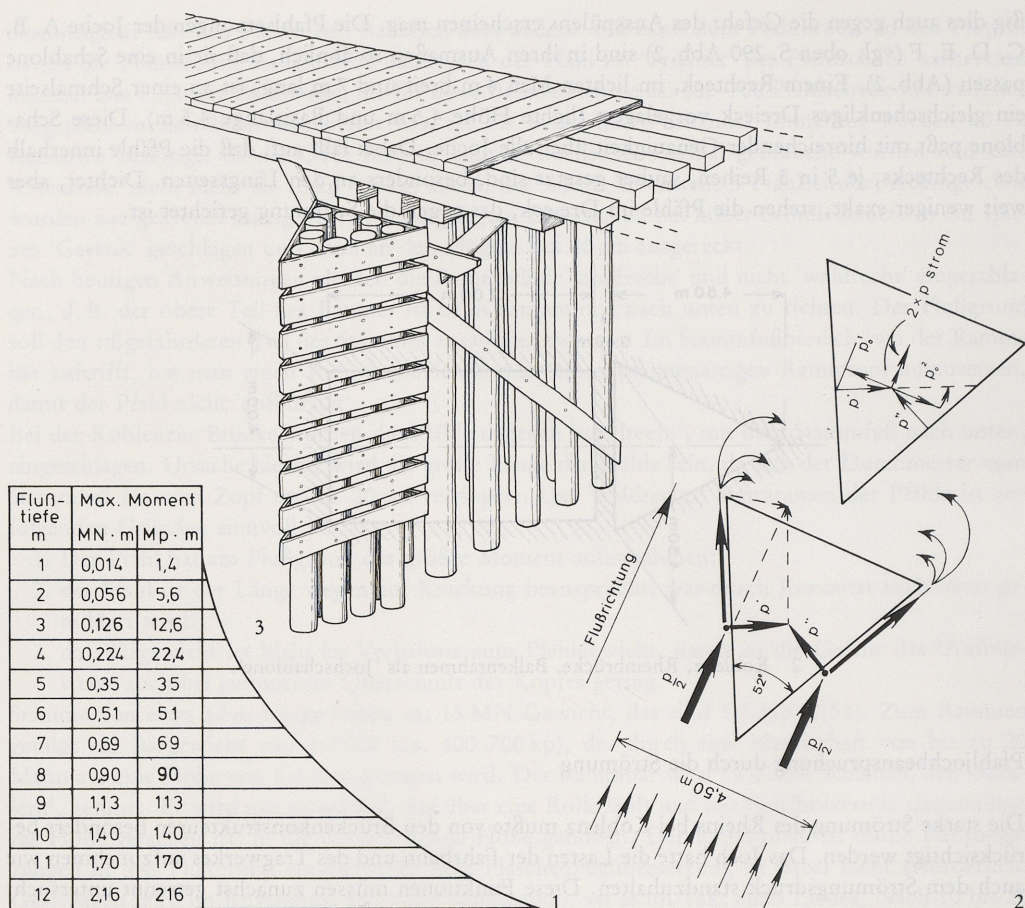
Pfahljochbeanspruchung durch die Strömung

Die starke Strömung des Rheins bei Koblenz mußte von den Brückenkonstruktoren besonders berücksichtigt werden. Das Joch hatte die Lasten der Fahrbahn und des Tragwerkes aufzunehmen wie auch dem Strömungsdruck standzuhalten. Diese Funktionen müssen zunächst getrennt untersucht werden, ungeachtet der weiterhin zu ziehenden Folgerungen, die eine Verbindung beider Aufgaben in einem System zwingend machen. Das eng gesetzte Dreieck diente als Wellenbrecher; das sorgfältig gesetzte Rechteck trug die Fahrbahn. Der Spitzwinkel am Wellenbrecher betrug ca. 52°. Dieser Winkel war vorn verplankt, um zu verhindern, daß sich dort Treibholz verhakte, wodurch zusätzliche Belastungen auf die Joche entstanden wären. Im ungünstigen Fall können Treibhölzer wie Hebelarme wirken und einzelne Pfähle extrem belasten. Das gilt auch für den gefährlicheren, oft mit Hochwasser verbundenen und auf ganzer Flußbreite angreifenden Eisgang.

Zur Ermittlung der angreifenden Kräfte ist die Bernoulli'sche Gleichung anzusetzen:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 \left[\frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \right]$$

wobei v_2 , unmittelbar hinter der Verplankung, mit 0 angenommen werden soll, was in Wirklichkeit wohl zu ungünstig ist. Vermutlich war die Spitze nicht voll verbrettert; es genügte eine Verplankung mit Zwischenräumen, die gerade so weit waren, daß das Verhaken von Treibholz verhindert wurde. So konnte ein Teil des andrängenden Wassers durchströmen, und der Wasserdruck wurde entsprechend geringer, ein besonderer Vorteil der Pfahljochbrücke. Bei Hochwasser um 8 m über Grund wurden nach Messungen Strömungsgeschwindigkeiten von 2,5 m/s (Abb. 1) erreicht. Bei Mittelwasser, ca. 4 m über Grund, ist die Strömungsgeschwindigkeit 1,8 m/s. Da die Geschwindigkeiten mit dem Quadrat in die Gleichung eingehen, muß die Hochwasserbelastung bei den statistischen Berechnungen einbezogen, die Mittelwasserbelastung kann dagegen vernachlässigt werden. Die Strömungsgeschwindigkeit wird von der Oberfläche zum Flußgrund hin geringer, auch das sei vernachlässigt. Wenn $p_2 = 0$, so lautet die Gleichung:



3 Koblenz, Rheinbrücke. Wellenbrecher und Strömungsangriff.

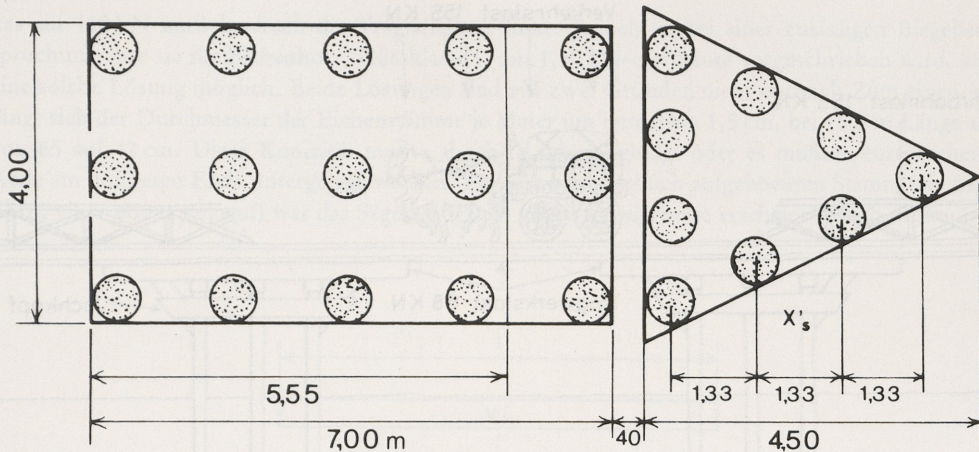
1 Zunahme des Belastungsmoments entsprechend der Flußtiefe. – 2 Zerlegung im Wellenbrecherdreieck. – 3 Verbindung von Joch und Wellenbrecher.

$$p_1 = \frac{q}{2} \cdot v_1^2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Auf eine Verplankung von $4,5 \cdot 1 \text{ m}$ greift dann eine Kraft von 140 kN an. Der keilige Wellenbrecher läßt einen Teil der Kraft abgleiten und einen Teil senkrecht zur Schräge einwirken. Die einwirkende Kraft wird erneut zerlegt, ein Teil stützt sich gegen die gleiche, von der gegenüberliegenden Schräge angreifende Kraft ab, die aus beiden Schrägflächen in Stromrichtung wirkende addiert sich (Abb. 3,2). Somit verbleiben 28 kN (2800 kp). Für einen solchen am Flußgrund einseitig eingespannten Träger ist das Moment

$$M = \frac{q \cdot l^2}{2} \text{ MNm.}$$

Bei 8 m Wassertiefe wird das Wellenbrecherdreieck mit $0,9 \text{ MNm}$ ($90 \text{ Mp} \cdot \text{m}$) belastet. Dieses Moment nimmt, der gezeichneten Parabel (Abb. 3,1) entsprechend, mit ansteigendem Wasserstand und damit ohne Zweifel noch höherer Strömungsgeschwindigkeit schnell zu und wird kritisch. Aus Abb. 4 geht jedoch hervor, daß der Wellenbrecher, gestützt auf das insgesamt 11 m lange Gesamtjoch, das 9fache Moment aushalten kann. Das System muß also durch geschickt angebrachtes Fachwerk verbunden gewesen sein.



$$\begin{aligned} \Delta F &= 0,196 \text{ m}^2 \text{ bei } 0,45 \text{ m } \varnothing \\ \Sigma \Delta F &= 24 \cdot 0,96 = 471 \text{ m}^2 \\ \Sigma \Delta F \cdot x &= 26,2 \text{ m}^3 \\ \text{Schwerpunkt } x_s &= 26,2 : 4,7 = 5,55 \text{ m} \\ \Sigma J &= \Sigma \Delta F \cdot \Delta x_s^2 = 67 \text{ [m}^4\text{]} \\ W_0 &= 10,6 \text{ m}^3 \\ W_4 &= 12,1 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nur Wellenbrecher: } \Sigma J' &= \Sigma \Delta F \cdot x_s'^2 = 3,47 \text{ [m}^4\text{]} \\ W_0 &= 1,19 \text{ m}^3 \\ W_4 &= 2,20 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Trägheitsmomente 'Gesamtsystem' zu 'Wellenbrecher'
'67' \gg '3,4' [m⁴]

Vergleich der auf die vorderen Jochpfeile einwirkenden Zugbelastung bei 8 m Flußtiefe = 900 KNm
für Gesamtsystem Pfahljoch $\sigma_z \text{ max.} = \frac{900}{196} = 85,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

allein für Wellenbrecherdreieck $\sigma_z \text{ max.} = \frac{900}{1,19} = 756 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

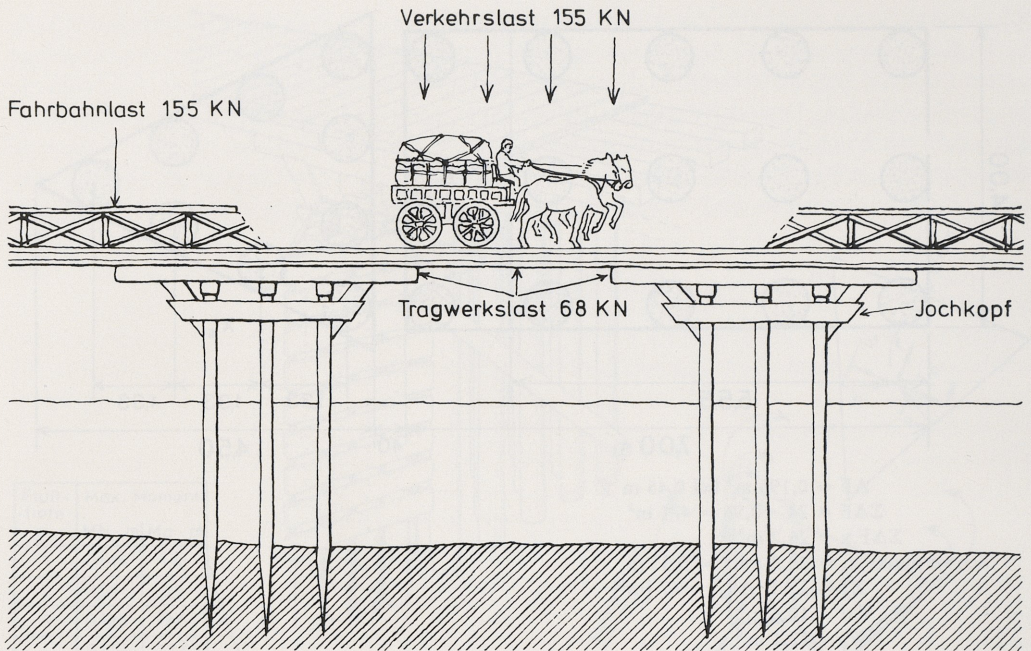
Der Wellenbrecher allein ist 9 x stärker belastet als – bei gleichem Momentangriff – das gesamte Pfahlsystem.

4 Koblenz, Rheinbrücke. Berechnung des Gesamtjoches aus der Belastung durch die Strömung.

Jochbeanspruchung durch Verkehrs- und Tragwerksbelastung

Das hinter dem Wellenbrecherdreieck liegende Pfahlrechteck unterlag in der Hauptsache den von oben und von den Flanken her angreifenden Lasten und Momenten. 3 x 5 Pfeile, sauber im Rechteck gesetzt, müssen die Fahrbahn getragen haben. Damit kann diese mit einiger Wahrscheinlichkeit auf ca. 7 m Breite bestimmt werden. Jeder Pfahl (der durchschnittliche Durchmesser erreicht 45 cm) hatte eine Fläche von 1500 cm². Die zulässige Auflagerpressung wird mit 0,2 kN/cm² angenommen, dann ist für 15 Pfeile eine Auflagerpressung von 4500 kN (450 Mp) zulässig. Das geht über die zu erwartende, senkrecht über dem Joch angreifende Belastung weit hinaus.

Für den Ansatz von möglichen Konstruktionen sind aber die Momente, die Kraftangriffe an den Hebelarmen, viel kritischer. Als Verkehrslast sind zweiachsige Fuhrwerke und einachsige Karren mit je einer Achslast von 10 kN (1 Mp) anzunehmen. Dieses Gewicht erreicht auch ein Fuhrmann



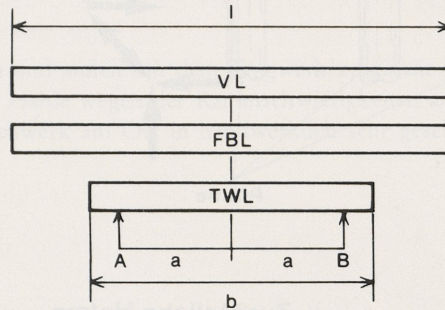
5 Koblenz, Rheinbrücke. Berechnung der Beanspruchung durch Verkehrslast, Fahrbahnabdeckung und Tragwerkslast.

mit 2 Zugtieren. Bei einer Spannweite von 15,5 m zwischen den Jochen entstand durch den anzunehmenden Verkehr auf zwei Fahrspuren mit einer Gesamtbreite von 7 m eine Belastung von ca. 155 kN. Hinzu kam eine solide Fahrbahnabdeckung aus Spaltbohlen wie bei Knüppeldämmen (0,15 m stark und 7 m lang) mit einem Zuschlag für Schrammbord und Geländer. Dadurch entstand ebenfalls eine Last von 155 kN (vgl. Abb. 5; der anzunehmende Verkehr ist durch den einzelnen Wagen nur angedeutet).

Tragwerkskonstruktionen

Zu den Tragwerkskonstruktionen gibt es kaum Hinweise. Einzig Trajans Pfahljochbrücke über die Donau mit je vier senkrecht eingerammten Jochpfählen und äußerst sparsamen Streben gibt ein knappes Bild. Aus den Maßangaben der Caesarbrücke übernehmen wir das Balkenmaß von 0,4 x 0,4 m. Über den drei Fünferreihen der Pfähle eines jeden Joches muß je ein Tragholm gelegen haben. Im ersten, einfachsten Falle könnten darauf 9 Stämme, mindestens an den Auflagerstellen flächig abgebeilt, 15,5–16 m lang, von Joch zu Joch aufgelegt gewesen sein. Der erste und dritte Holm unterfing diese nach beiden Seiten zu den Nachbarjochen laufenden Balkenlagen. Durchmesserunterschiede zwischen Wurzel und Zopf wurden durch Unterlagen an den Zöpfen ausgeglichen. Die lichte Weite war dann 11,5 m. Zur Verkehrslast von 150 kN und zur gleich hohen Last der Fahrbahndecke kommt die Tragwerkslast dieser Stämme von 190 kN, ein Gewicht, das sich statisch in durchaus zulässigen Grenzen bewegt (Abb. 6). Beim Auflegen von nur 5 solcher Stämme, die auf den Holm direkt über den Köpfen der 5 Jochpfähle zu liegen kommen, geht die Last des Trag-

kes auf 110 kN zurück. Auch die Tragfähigkeit sinkt. Jedoch ist bei einer zulässigen Biegebeanspruchung, wie sie für Eichenholz, Güteklasse I, mit 1,30 kN/cm² heute vorgeschrieben wird, auch eine solche Lösung möglich. Beide Lösungen sind aus zwei Gründen nicht optimal: Zum einen verjüngt sich der Durchmesser der Eichenstämmen je Meter um immerhin 1,5 cm, bei 15,5 m Länge also von 65 auf 42 cm. Diese Konizität mußte abgebeilt oder abgesägt oder es mußten entsprechende Keile am dünneren Ende untergelegt werden. Bei einem mannshoch aufgebockten Stamm (ein Säger oben, einer unten stehend) war das Sägen möglich. Diese Arbeitsweise erscheint jedoch unrationell.



Auflagerkraft $A = B = 190 \text{ kN}$ (19 Mp)

Abstand des Auflagers von Jochmitte $a = \frac{\text{Jochabstand}}{4} = 3,875 \text{ m}$

Jochabstand $l = 15,5 \text{ m}$
 Brückenbalkenlänge $b = 10 \text{ m}$

$$M_{\max} = A \cdot a - \frac{VL}{2} \cdot \frac{l}{4} - \frac{FBL}{2} \cdot \frac{1}{4} - \frac{TWL}{2} \cdot \frac{1}{4} [\text{kN} \cdot \text{m}]$$

$$M_{\max} = 74 = 30 - 30 - 8,5 = 5,5 \text{ kNm}$$

zulässig für Eichenholz Gütekl. I: $\sigma_B = \frac{1,3 \text{ kN}}{\text{cm}^2}$

Für die Balkenanordnung von 5 Balken $0,4 \times 0,4 \text{ m}$: Widerstandsmoment $\frac{b \cdot h^2}{6} \cdot 5 = 54\,000 \text{ cm}^3$

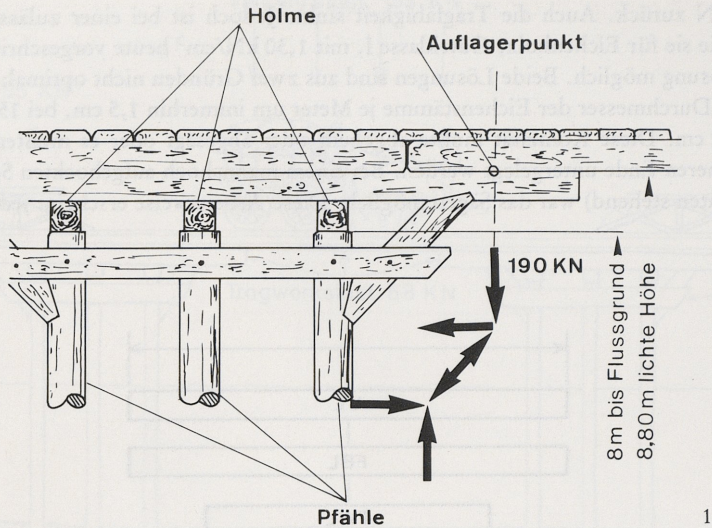
zul. $M = \text{zul. } \sigma \cdot W = 700 \text{ kNm}$,

Dem in Jochmitte angreifenden max. Moment von 55 kNm steht ein zulässiges Moment von 700 kNm gegenüber.

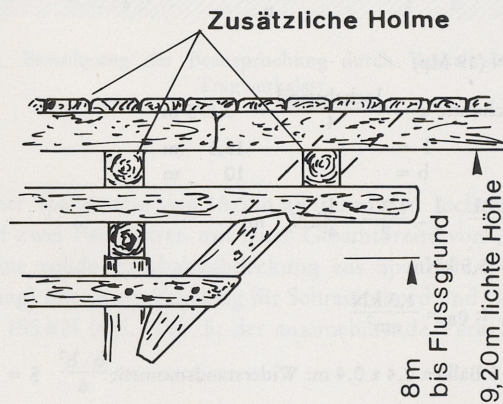
6 Koblenz, Rheinbrücke. Berechnung des maximalen und zulässigen Moments in der Mitte zwischen den Jochen.

Dagegen waren es römische Bau- und Handwerksmeister durchaus gewohnt, jeden Gewölbebau bis zum Setzen des Schlußsteines mit hölzernem Sprengwerk zu unterfangen. Doch darf man für die Koblenzer Pfahljochbrücke mit ihren weitgesetzten Holzpfählen nicht ein solches hervorragend und dicht gezimmertes Sprengwerk, wie z. B. auf der Trajanssäule dargestellt, erwarten. In Koblenz standen 15 Holzpfähle auf 28 m² verteilt im Fluß. Auf sie mußte eine Konstruktion abgestützt werden, die technisch zwischen Caesars Pioniersteg und den auf Steinpfeilern abgestützten Konstruktionen der späteren Zeit liegt.

Hier ist eine Lösung nach Abb. 7,1 wahrscheinlicher. Es sei eine Balkenlänge von 10 m angenommen, die Balkenstärke beträgt $0,4 \times 0,4 \text{ m}$. Diese Balken werden mittig über die Pfahlköpfe auf die Verbindungsholme gelegt. Dabei reichen 5 Stück unter der Fahrbahnbreite aus. Dann werden 5



1



2

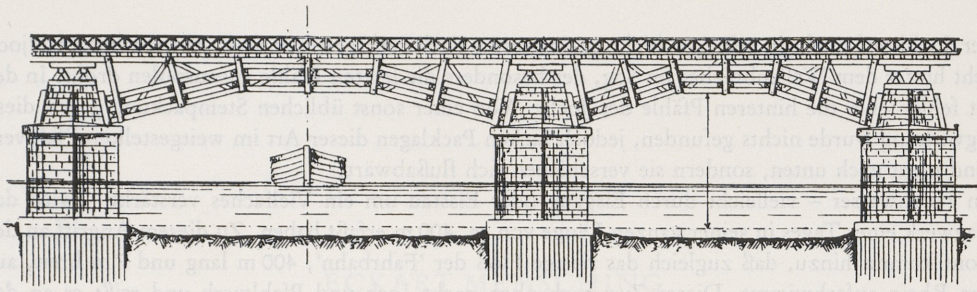
7 Koblenz, Rheinbrücke. Konstruktion der Jochköpfe.

1 Tragwerk 0,8 m über dem Pfahlkopf aufgelegt. – 2 Tragwerk 1,20 m über dem Pfahlkopf aufgelegt.

ebensolche Balken überbrückend von Joch zu Joch geschoben. Damit werden die Hebelarme für Lasten und Auflagerkräfte kürzer, die Konstruktion ausgewogener, sicherer, gekonnter.

Daneben bietet sich eine weitere Variante an (Abb. 7,2). Im Auflagerpunkt wie auch senkrecht über den ersten Holmen wären noch einmal auf den unteren Tragwerksbalken Holme zu legen und darauf dann die Brückenbalken. Man würde so zusätzlich 0,4 m Höhe zu den 0,8 m über Pfahl gewinnen und erreichte damit die lichte Höhe der Kölner Brücke nach Kraus (Abb. 8)⁵. Bei dieser Konstruktion werden die senkrecht über dem Joch stehenden Lasten auch senkrecht aufgenommen, dafür waren oben in der Berechnung Reserven ausgewiesen. Die zwischen den Jochen hängenden Lasten werden von den Tragwerksbalken aber auch von ganz einfach zu denkenden Streben auf die Jochpfähle verteilt. So steift sich die gesamte Brücke von Brückenbalken zu Brückenbalken in die Joche hinein und gegenseitig ab, wodurch ein hohes Maß an Sicherheit erreicht wird. Die Joch-

⁵ O. Kraus, Bonner Jahrb. 130, 1925, 232 ff.



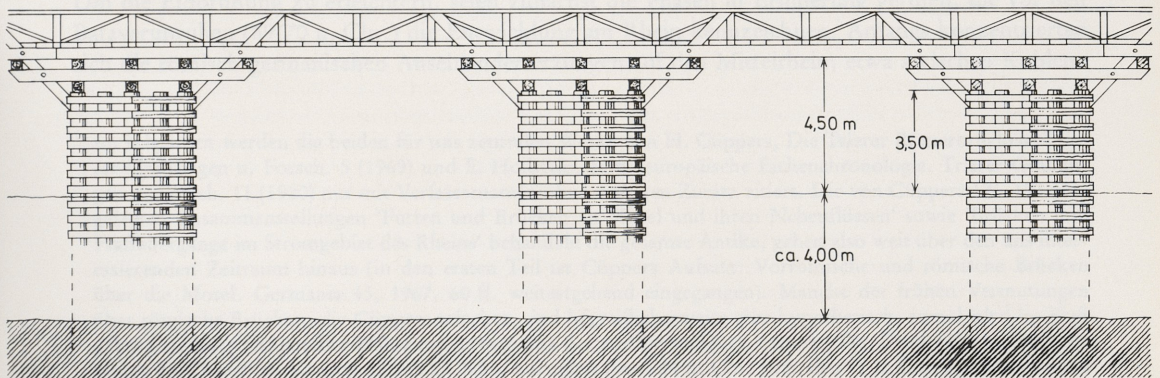
8 Rekonstruktion der konstantinischen Rheinbrücke bei Köln (nach O. Kraus).

pfähle müssen oben, innen und außen mit dem Tragwerk zu einem Jochkopf verbunden worden sein. Je weniger genau die Pfähle wegen der Rammschwierigkeiten ausgerichtet sein konnten, um so besser mußte dieses Fachwerk am Ort in handwerklich sehr geschickter Weise angepaßt werden.

Zusammenfassung

Auf Grund des vorgefundenen Grundrisses der Pfahlstellung konnte eine Pfahljochbrücke rekonstruiert werden (Abb. 9). Zur Klärung konstruktiver Möglichkeiten, wie 'Wellenbrecher', 'Tragwerkskonstruktion', Brückenbreite und Jochbelastung wurden diese Elemente getrennt untersucht.

Die Konstrukteure werden – wie heute auch – eine hohe Belastbarkeit der Brücke angestrebt haben; Grenzen werden durch die zur Verfügung stehenden Baumaterialien und die Techniken gesetzt. Beschränkt ist z. B. die Baumstammlänge, ca. 10–12 m; Grenzen werden auch durch die Ramntechnik gesetzt. Die Belastungen aus Flußtiefe, Strömungsgeschwindigkeit und von Jahr zu Jahr fortschreitender Verrottung des Holzes nehmen mit einer Exponentialfunktion zu. Die Berechnungen zeigen, daß der Wellenbrecher bis zu 8 m Flußtiefe noch ausreichend stabil ist. Stützt man ihn aber auf das Rechteck ab, so ergibt sich, daß der 9fache Widerstand gegen Aushebelung erreicht werden kann. Das müssen auch die Brückenbauer gekannt und genutzt haben. Wie aber die Versteifung angelegt wurde, ist nicht bekannt. Es werden Streben oder 'Schwerter' hinter dem Dreieck längs der Fünferreihe angeschlagen gewesen sein.



9 Koblenz, Rheinbrücke. Rekonstruktion. – Maßstab ca. 1 : 125.

Der Jochkopf muß ein sehr geschickt gezimmertes Fachwerk gewesen sein. Ein solches Pfahljoch steht hinter dem Wellenbrecher im Sog, der besonders die letzten Pfähle auszuspülen droht. In der Tat fehlen eher die hinteren Pfähle der Joche. Von einer sonst üblichen Steinpackung gegen diese Sogwirkung wurde nichts gefunden, jedoch sacken Packlagen dieser Art im weitgestellten Pfahlverbund nicht nach unten, sondern sie verschieben sich flußabwärts.

Ein Hochwasser – vielleicht durch Eisgang oder Eisstau um ein Vielfaches verstärkt – wird das Tragwerk eines Tages in seiner ganzen Länge von ca. 400 m erfaßt haben. Zu diesem Angriff an der Front kommt hinzu, daß zugleich das riesige Floß der 'Fahrbahn', 400 m lang und 7 m breit, auf dem Rhein aufschwimmt. Dieser Zug nach oben packt Joch und Pfahlwerk und reißt es an der schwächsten Stelle ab.

Die Koblenzer Pfahljochbrücke wird bei wechselnden Wasserständen auf Grund der fortschreitenden Verrottung der Hölzer nicht viel länger als 50 bis 100 Jahre gestanden haben. Über diesen Zeitraum hinaus dürfte die Brücke nicht nutzbar gewesen sein, da keine später nachgesetzten Pfähle gefunden wurden.