

Der Mythos der Grubenmann'schen Rheinbrücke bei Schaffhausen

Hans Ulrich Grubenmann baute im Jahr 1755 eine beeindruckende Holzbrücke über den Rhein. Der ehrgeizige Zimmermann zeigte dem Stadtrat in einem ersten Entwurf eine Tragkonstruktion, welche den Rhein in einem einzigen Bogen überspannt hätte.

Der Rat war damit nicht einverstanden und verlangte von Grubenmann, dass er den steinernen Mittelpfeiler von der vorherigen Brücke in seine Konstruktion mit einbeziehen müsse. Widerstrebend tat er, was die Ratsherren verlangten und legte ihnen einen zweiten Entwurf vor, welcher aus zwei Bögen hin zum Mittelpfeiler bestand.

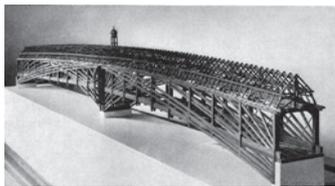


Abb. 1: Modell im Museum Allerheiligen, Schaffhausen

Interessanterweise kombinierte Grubenmann seinen zweiten Entwurf mit dem Hängesprengwerk (Abb. 1) aus dem ersten, welches einen Bogen bildete, der den gesamten Fluss überspannte. Zweifelsohne wurde durch diese Massnahme der Mittelpfeiler entlastet und Gerüchten zufolge soll die Brücke sogar ohne Mittelpfeiler tragfähig gewesen sein, was Grubenmann stets selber behauptet hat. Der englische Geistliche, Historiker und Reisende William Coxe (1747–1828), der sich sehr intensiv mit Grubenmanns Bauwerken auseinandergesetzt hat, schrieb 1778: «Ich ging an den mittleren Pfeiler unter die Brücke, um ihre Mechanik zu untersuchen, und so wenig ich auch Mechaniker bin, so war ich

doch von der schönen Simplizität der Architektur betroffen. Ich war nicht im Stande, zu bestimmen, ob sie auf dem mittleren Pfeiler ruht, aber die meisten behaupten, sie tue es nicht.»¹ Und berichtet weiter: «Bei einem Besuch in Teufen bei Grubenmann wurde auch von der Schaffhauser Brücke gesprochen. Grubenmann versicherte hierbei, dass sie nicht auf dem mittleren Pfeiler ruhte und nur aus einem Bogen bestünde.»² Als die Franzosen 1799 im Krieg gegen Österreich waren, brannten sie die aussergewöhnliche Holzbrücke ab, um ihren Rückzug zu sichern.

Offen bleibt die Frage, ob die Brücke auch ohne Mittelpfeiler gehalten hätte. Ein Grossteil der bisherigen Analysen ergibt, dass der Mittelpfeiler unabdingbar war.³ Eine reine Handrechnung des

als endgültig angesehen werden. Aus diesem Grunde wurde in einer Studie ein detailliertes Stabmodell aufgebaut und gerechnet.

Modellbildung

Dank dem Balsler Kupferstecher und Kunstverleger Christian von Mechel (1737–1817), der 1802 eine Radierung nach dem Originalplan sowohl des ersten als auch des zweiten Entwurfs (Abb. 2) erstellte, sind die Pläne in ausgezeichneter Qualität erhalten. Als Vorlage zur Generierung der Modellstruktur dienen die Zeichnungen von Mechels.

Bemerkenswert ist, dass die Brücke nicht geradlinig verläuft, sondern in der Mitte einen Knick aufweist. Es lässt sich vermuten, dass die Auflage auf dem Mittelpfeiler notwendig ist, um die Ablenkkräfte abzufangen.

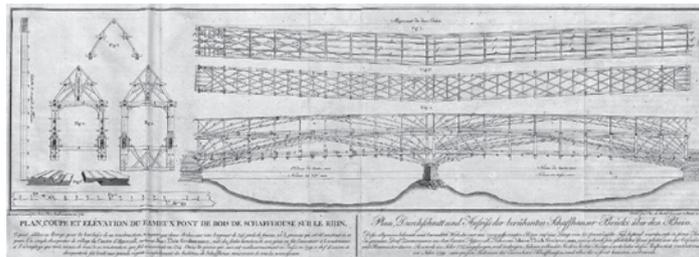


Abb. 2: Radierung des zweiten Entwurfs nach dem Originalplan.

Modells kann aufgrund der statischen Unbestimmtheit aber nicht

Das Sprengwerk unterhalb der Fahrbahn nimmt die Brückenlast in Form von Druckkräften auf und verkürzt somit die freie, nicht gestützte Brückenlänge. Die Konstruktion zwischen Fahrbahn und Dachstock kann unter zwei Gesichtspunkten betrachtet werden: Zum einen als Hängewerk, über das die Fahrbahn an dem oberen Balken über seitliche, schräge Streben gestützt an den vertikalen Hängesäulen aufgehängt wird. Oder aber man betrachtet die seitlichen Streben als Stützen, welche die Last des Daches aufnehmen, wodurch sie

als Sprengwerk angesehen werden können. Um keine Missverständnisse bei der Bezeichnung zu generieren, wird der mittlere Teil als Hängewerk betrachtet. Das Mansarddach überspannt die Brücke, leitet die Gewichtslast des Daches in die Auflager und entlastet so den Mittelteil der Brücke. Die Balken, welche die Fahrbahn tragen, werden als Untergurte, jene, an welchen die Fahrbahn über Hängesäulen befestigt ist und die gleichzeitig das Dach tragen, als Obergurte bezeichnet.

Betrachtet man die Zeichnung, welche von von Mechel erstellt wurde, und das von Grubenmann ausgearbeitete Originalmodell im verkleinerten Massstab (Standort: Museum Allerheiligen, Schaffhausen), erkennt man konstruktive Abweichungen. Augenfällig ist, dass das Hängesprengwerk in den Zeichnungen gestuft in den Obergurte läuft, wobei beim Modell alle Strebebänder direkt in den Mittelpfeiler verlaufen. Dem hier betrachteten Simulationsmodell werden die Zeichnungen von Mechels zugrunde gelegt.

Die Brücke wird mit der Software RStab von Dlubal Ingenieur Software (Version 7.04.3310) modelliert, einer Statiksoftware zur Berechnung von ebenen und räumlichen Stabwerken. Die Brückenkonstruktion wird zu einem Stabmodell vereinfacht, wobei sämtliche tragenden Holzbalken und Stahlverstrebungen aus den Zeichnungen von Mechels erfasst werden. Die Verbindungsstellen entsprechen im idealisierten Modell Knoten, die sich ideal biegesteif verhalten.

Brückenkonstruktionen werden an den Ufern grundsätzlich auf einer Seite lose gelagert, damit dort Temperaturschwankungen kompensiert werden können. Aus den Zeichnungen

¹ Josef Killer. Die Werke der Baumeister Grubenmann. Zürich 1941.

² Walter Henne, Alex Wildberger. Die Grubenmannsche Rheinbrücke in Schaffhausen. In: Schaffhauser Mappe 1979, S. 8-10.

³ Walter Henne, Alex Wildberger. Die Grubenmannsche Rheinbrücke in Schaffhausen. In: Schaffhauser Mappe 1979, S. 8-10; Ausserdem: Grubenmanns Brücken. In: TEC21 42-43, 2009, S. 26-31; Angelo Navone, Nicola Maggi. John Soane. Mendrisio 2003; Rosmarie Nüesch-Gautschi. Baumeister Hans Ulrich Grubenmann. In: Teufener Heft 4, 1985, S. 14-19.

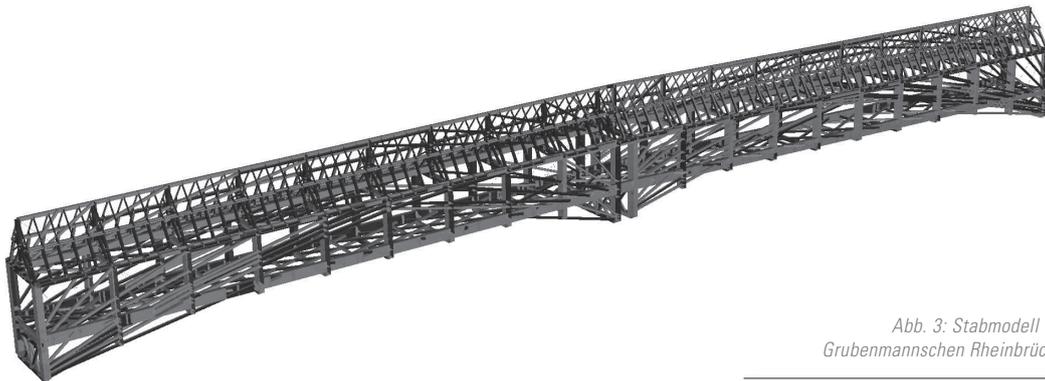


Abb. 3: Stabmodell der Grubenmanns Rheinbrücke.

gen von von Mechel geht hervor, dass die Lagerung an beiden Ufern eine Verschiebung in horizontaler Richtung blockierte. Der Untergurt wurde sogar so in das Fundament eingebettet, dass an der Lagerstelle auch Momente aufgenommen werden konnten. Somit werden im Modell zwei Festlager angenommen. Zudem wird der Mittelpfeiler im Modell als auf dem Fundament aufliegend angenommen. Ein allfälliger Überstand der unbelasteten Brücke vor der Setzung wird nicht berücksichtigt.

Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass das Holz für die Brücke aus dem Bregenzer Wald in Österreich nach Schaffhausen geschifft wurde.¹ Gemäss den Angaben eines ortsansässigen Forstwarts kann die Auswahl der Holzart für eine Brückenkonstruktion aus jener Zeit auf die Weiss- und Rottanne begrenzt werden. Das Holz verhält sich bis zu einem gewissen Bereich sowohl in Zug- als auch in Druckrichtung linearelastisch (Tabelle 1). Die Stahlverstrebungen wurden ebenfalls im Modell berücksichtigt. Es wird ein homogenes Materialverhalten angenommen.

In den Aufzeichnungen von Mechels ist das Eigengewicht der Brücke mit 2500 kg/m angegeben.² Auf die gesamte Brücke gerechnet kommt man so auf ein Gewicht

von 272 500 Kilogramm. Mit der hier modellierten Stabstruktur ergibt sich ein Gesamtgewicht von 271 658 Kilogramm. Die Zusatzgewichte von Fahrbahn, Dachabdeckung und Verbindungselementen wie Schrauben und Beschläge, welche nicht detailliert im Modell erfasst werden können, werden mit einer Masse von 30 000 Kilogramm geschätzt. Diese Zusatzmasse wird durch eine Dichteerhöhung des Holzes berücksichtigt (Tabelle 1).

Um das Verformungsverhalten der Brücke zu simulieren, werden die Stoss- und Versatzverbindungen der hochbelasteten Balken mit einem Schlupf versehen. Nach SIA 265 können die Anschlussverformungen in Verbindungsstössen mit 1,5 mm angenommen werden. Im Model unberücksichtigt bleiben Temperaturschwankungen, Wind-

und Schneelasten, sowie Materialfehler und der Feuchtigkeitseinfluss auf das Holz. Auf die Nutzlasten wird weiter unten detailliert eingegangen.

Resultate

Die Fachwerkstruktur wird hinsichtlich ihres Steifigkeits- und Festigkeitsverhaltens, sowie ihrer Stabilität (Gesamtstruktur und Einzelstäbe) analysiert. Als besonders kritisch zu bewerten sind Verbindungsstellen, welche aus konstruktiven Gründen teilweise geringere tragende Querschnitte aufweisen. Das Verhalten der Brücke wird in dieser Studie in einem ersten Schritt allein unter dem Eigengewicht analysiert, d.h. es wird überprüft, ob die Brücke auch ohne mittleren Pfeiler unter dem Eigengewicht gehalten hätte. Anschlies-

send wird die Traglast der Brücke unter Flächen- und Einzellast untersucht.

Wird das mittlere Lager freigegeben, zeigen die Resultate, dass ein Grossteil der Streben des Hängesprengwerks bei den Verankerungen am Ufer unter den herrschenden Druckspannungen eingeknickt wären. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Brücke mit hoher Sicherheit aufgrund von Stabilitätskriterien nicht ohne Mittelpfeiler gehalten hätte. Auch die Annahme, dass sehr hochwertiges Holz verwendet wurde, führt zu keiner ausreichenden Sicherheit. Die Zugstangen aus Stahl über dem Mittelpfeiler verlieren ohne mittleres Auflager ihre eigentliche Funktion und knicken aufgrund der auftretenden Druckbelastung. Die Druckstreben des Mittelpfeilers werden auf Zug beansprucht, was wiederum nicht zulässig ist, da die Verbindungen zu den Anschlusselementen nicht für Zugkräfte ausgelegt wurden. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Konstruktion rein aufgrund ihres Aufbaus eines Mittelpfeilers bedurfte.

Ignoriert man in der Berechnung sowohl die Stabilitätskriterien als auch die Festigkeitswerte der verwendeten Materialien, stellt sich ohne Berücksichtigung von Setzvor-

Tabelle 1:
Mechanische und physikalische Werkstoffkennwerte

Werkstoff	Dichte [kg/m ³]	E-Modul [N/mm ²]	Festigkeitswerte [N/mm ²]		
			Zug	Druck	Schub
Baustahl S235, DIN 18800: 1990-11 ¹	7,85	210 000	235	235	NA
Nadelholz, DIN 1052: 2008-12 ²	0,60	11 000	8	12	1,5
Nadelholz inkl. Zusatzmassen	0,67	11 000	8	12	1,5

¹ Technische Streckgrenze

² Bemessungswerte parallel zur Faser gemäss SIA 265, Holzbau, Festigkeitsklasse C24. (SIA-Norm 265 – Holzbau)



Abb. 4: Durchbiegung, Seitenansicht X-Z-Ebene (Verformung 20x überhöht). Aufgrund des Knicks in der Mitte fällt die Brücke unter einem Winkel von 1,46° auf die Seite.

gängen in der Mitte der Brücke eine maximale vertikale Verschiebung von 458 mm ein (Abb. 4). Unter Berücksichtigung eines Setzens in den wichtigsten Verbindungsstellen von jeweils 1,5 mm, erhöht sich die Verschiebung auf 526 mm. Inklusiv Kriecheinfluss beträgt die Gesamtverformung unter ständigen Lasten ein Mehrfaches der in der aktuellen Norm SIA 260 aufgeführten Gebrauchsgrenze.⁵

Wird die Brücke auf dem Mittelpfeiler gelagert, so verfügt sie rein durch ihr Eigengewicht belastet über eine ausreichende Tragfähigkeit.

In einem zweiten Schritt ist zu klären, ob die Brücke unter der Berücksichtigung des mittleren Auflagers gebrauchstauglich ist und mit welcher Tragfähigkeit zu rechnen war. Dazu werden zwei Lastfälle angenommen, welche die historischen Gegebenheiten widerspiegeln sollen:

- Lastfall Pferdegespann: Schaffhausen war damals ein wichtiger Warenumschiessplatz. Demzufolge muss davon ausgegangen werden, dass schwere Pferdegespanne die Brücke überquert haben. Es wird der Fall betrachtet, bei dem zwei voll beladene

Sechsspänner gleichzeitig mit je 12 Tonnen (6 x 1 Tonne pro Pferd & Fuhrwerk) die Brücke überqueren und sich jeweils in der Mitte zwischen dem mittleren Lager und dem Ufer befinden. Die Last wird auf den Streben unter der Fahrbahn als Punktlast aufgebracht.

- Lastfall Menschenmenge: Bei diesem Lastfall wird davon ausgegangen, dass sich auf der Brücke pro Quadratmeter zwei Personen aufhalten. Die Belastung führt zu einer uniform verteilten Flächenlast auf der Fahrbahn von 120 Tonnen.

Mit einer zusätzlich aufgebrauchten Nutzlast, im kritischsten Fall einer grossen Menschenmenge, sinkt die Sicherheit gegen Knicken für das Sprengwerk von 1,5 auf 1,2. Die Sicherheiten hinsichtlich der Festig-

keit der Konstruktion sind deutlich höher. Einzig die Schubspannungen an den Uferlagern der grossen Brückenseite überschreiten die zulässigen Werte. Hierbei ist zu bemerken, dass an diesen Stellen mit geringeren Spannungen gerechnet werden kann, da ein beträchtlicher Teil vom Fundament aufgenommen wird. Weitere Resultate sind in Tabelle 2 zusammengefasst. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Nachweise nicht den aktuellen SIA Normen entsprechen, sondern auf den oben angenommenen Lastfällen basieren.

Schlussfolgerungen

Die Studie hat gezeigt, dass das mittlere Auflager unabdingbar war, um genügend hohe Sicherheiten hinsichtlich Instabilitäten oder Versagen der Brücke zu garantieren. Die Eindeutigkeit des Resultats legt die Vermutung nahe, dass sich Grubenmann aufgrund seines grossen Wissens und seiner Erfahrung dieser Tatsache bewusst war. Vielmehr hat er vermutlich an seiner Behauptung festgehalten, weil er durch die Auflage der Ratsherren in seinem Berufsstolz gekränkt wurde.

Die Berücksichtigung eines Mittelpfeilers führt zudem zu ei-

nem Knick in der Brückenachse, was zu erheblichen Stabilitätsproblemen geführt hat. Es wäre interessant zu untersuchen, wie es sich mit der Tragfähigkeit des ersten Entwurfes verhalten hätte. Damit könnte man eine Bestätigung für den kühnen Versuch einer 120 Meter langen Brücke liefern, die Grubenmann bauen wollte. Oder aber die Entscheidung der Ratsherren bekräftigen, dass die Brücke auf den Mittelpfeiler geführt werden müsse, da sie über eine solche Länge nicht halten würde.

Markus Henne, Adrian Rohner, Felix Wenk
Hochschule für Technik Rapperswil HSR

Weitere Details können in der Semesterarbeit von Adrian Rohner vom Frühlingsemester 2011, der Abteilung Maschinentechnik der Hochschule für Technik Rapperswil HSR nachgelesen werden.

Tabelle 2:
Zusammenfassung der Sicherheiten

Model	Sicherheit gegen			
	Knicken	Stauben	Reissen	Scheren
Nur Eigengewicht, ohne Auflager	0,3	0,6	0,9	0,3
Nur Eigengewicht, mit Auflager	1,5	2,9	4,7	1,1
Eigengewicht mit Fuhrwerk	1,4	2,7	5,2	1,1
Eigengewicht mit Menschenmenge	1,2	2,3	4,0	0,9

Das dynamische Verhalten der Brücke wurde in dieser Studie nicht betrachtet.

⁵ SIA-Norm 260 – Grundlagen der Projektierung von Tragwerken.