

22



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000301249





# BETONBRÜCKE MIT GRANITGELENKEN

ÜBER DIE EYACH

BEI IMNAU IN HOHENZOLLERN.

---

VON

**MAX LEIBBRAND,**  
LANDESBAURATH IN SIGMARINGEN.

MITGETHEILT VOM OBERINGENIEUR ALFRED GAEDERTZ.

---

MIT 10 ABBILDUNGEN IM TEXT UND EINER KUPFERTAFEL.



*G. Nr. 24087.*

BERLIN 1898.

VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN.

(FORM. ERNST & KORN).



2389



IV 34533

Sonderdruck aus der Zeitschrift für Bauwesen,  
Jahrgang 1898.

Nachdruck verboten.

In den letzten Jahren hat die wiedererstandene Vorliebe für massive Brücken eine verhältnismäßig bedeutende Anzahl derartiger Bauwerke entstehen lassen, unter denen sich solche mit ganz bedeutenden Spannweiten befinden. Eine Zusammenstellung der hervorragenderen neueren Bauwerke dieser Art findet sich in dem vom inzwischen verstorbenen Präsidenten K. v. Leibbrand herausgegebenen 7. Hefte des Werkes „Fortschritte der Ingenieurwissenschaften“, worin insbesondere auch die Anwendung von Gelenken aus Eisen oder Blei besprochen wird. In diesem Buche ist auch (s. S. 70—73) der im Jahre 1895 ausgeführten Brücke von 43,3 m Spannweite über die Donau bei Inzigkofen Erwähnung gethan, welche besonders charakteristisch für neuere Brücken dadurch geworden ist, daß die Gelenke offen in Erscheinung treten und dauernd wirksam bleiben. Die Inanspruchnahme der gußeisernen Gelenke ist zu 283 at auf Druck und 127 at auf Biegung angegeben.\*) (Sich auch Zeitschrift für Bauwesen, Jahrgang 1896, Seite 279 und Génie Civil, Tome XXX Nr. 22.)

Die Erwägung, daß eiserne Gelenke hohe Kosten verursachen und daß die Unterbrechung des massiven Bogens durch eiserne Theile dem aesthetischen Empfinden nicht geläufig ist, haben den Erbauer der Inzigkofer Brücke, Landesbaurath M. Leibbrand in Sigmaringen, veranlaßt, bei dem Baue der 30 m weiten, massiven Bogenbrücke im Zuge der über die Eyach bei Imnau (Hohenzollern, 6 km von der Bahnstation Eyach der Linie Tübingen — Horb) führenden Vicinalstrasse die Gelenke aus Stein herzustellen. Um hierbei die Gewähr zu haben, daß die Gelenke den Bewegungen des Bogens auch in Wirklichkeit folgen können, wurden zwischen den polirten Gelenkflächen dünne Bleieinlagen angeordnet, die gewissermaßen als dauerndes Schmiermittel wirken, während bei den Bleigelenken, wie sie vom Präsidenten v. Leibbrand bisher angewandt wurden, die Bleieinlagen selbst als Gelenke zu wirken haben. Da, wie aus der Anordnung der Gelenke (sich Anlage Abb. 7) hervorgeht, den Gelenkquadranten sowohl in Bezug auf Biegungs- als auf rückwirkende Festigkeit hohe Inanspruchnahmen zugemuthet werden müssen, wurde für dieselben Granit zur Ausführung gewählt und wurden eingehende Versuche sowohl über die Biegungs- und die rückwirkende Festigkeit als auch über die Elasticität des zur Verwendung gewählten Granits, sowie schliesslich über die Wirksamkeit der Bleieinlagen angestellt.

Wir werden weiter unten auf diese theils vom Baudirector C. v. Bach in Stuttgart, theils vom Professor Föppl in München vorgenommenen Versuche zurückkommen.

Die Imnauer Brücke trat an Stelle einer durch die bekannten verheerenden Hochwasser der Eyach im Jahre 1895 zerstörten Jochbrücke. Um künftigen Hochwassern, die bei 4 mm Gefälle eine Geschwindigkeit von rund 5 m haben, möglichst

\*) Die dortige Angabe, daß die Gelenke je 2000 bis 3000 *M* gekostet haben, ist dahin richtig zu stellen, daß dieselben zusammen 3000 *M* gekostet haben. Bei einer Inanspruchnahme des Gußeisens bis 300 at auf Biegung, was zulässig ist, hätten dieselben für 2000 *M* hergestellt werden können bei 10000 kg Gesamtgewicht.

wenig Angriffspunkte zu bieten, konnte nur eine Brücke mit einer Oeffnung zur Erwägung kommen. Obgleich die Gründungsverhältnisse für eine Bogenbrücke ungünstige sind, ergaben vergleichende Berechnungen, daß eine Gewölbeconstruction billiger herzustellen war, als eine eiserne Fachwerkbrücke, wenn hierbei der Entwurf der Bogenbrücke so gestaltet wurde, daß

1. durch die möglichste Entlastung in der Nähe des Gewölbescheitels und durch Concentrirung der Eigenlast an den Kämpfern und in den Widerlagern die senkrechten Seitenkräfte der Fundamentdrucke möglichst groß gegenüber den wagerechten Seitenkräften wurden, und

2. durch die Anordnung von Gelenken etwaigen Bewegungen der Widerlager von vornherein ihre gefährliche Wirkung auf die Standfestigkeit des Gewölbes genommen war.

Für die Brücke, bei welcher 2,5 m Fahrbahnbreite mit beiderseitigen Gehwegen von je 0,75 m Breite, also eine Gesamtnutzbreite von 4 m, bei den geringen verfügbaren Mitteln genügen mußte, ergaben sich auf Grund des oben Angeführten folgende Anordnungen:

1. Für die Gehwege wurden flache Gewölbe zwischen in Abständen von 1,7 m quer zur Brücke gelegte Zorseisen betonirt, welche auf die ganze Breite der Gehwege über die Brückenstirnen hervorstehen.

2. Das Gewölbe, im Scheitel nur mit der Breite der Fahrbahn 2,5 m beginnend, erbreitert sich bis an die Kämpfer hin auf 3,5 m, wodurch neben der Verschiebung des Schwerpunktes der Eigenlast in die Nähe der Kämpfer eine wirksame Versteifung der Brücke gegen Winddruck, Hochwasser und Eisstoß erzielt ist. So wurde es auch möglich, das Gewölbe ohne Gefahr für seine Standfestigkeit in der Nähe der Kämpfer ins Hochwasser eintauchen zu lassen.

3. Zur Verminderung des Seitenschubes wird die Brückenfahrbahn, soweit sie nicht unmittelbar auf dem Gewölbe ruht, nur durch einzelne über die ganze Breite des Gewölbes reichende, 0,5 m breite Pfeiler unterstützt. Diese Pfeiler verjüngen sich vom Gewölberücken ausgehend bis auf die Breite von 2,5 m und sind durch 1,2 m weite Stichbogengewölbe verbunden.

Die verlorenen Betonwiderlager, in mehr als doppelter Breite des Gewölbescheitels, stützen sich am linken Ufer auf 41 Pfähle von 25 cm Stärke und von rund 4 m Länge, während auf dem rechten Ufer das Widerlager unmittelbar auf den Kiesgrund sich stützt. Da der Untergrund sich als wenig tragfähig erwies, wurden die Fundamentflächen so groß angeordnet, daß die Kantenpressung beim rechten Widerlager 2,2 at beträgt, während auf einen Pfahl des linken Widerlagers 15 t kommen.

Sowohl die Kämpfer- wie Scheitelgelenke bestehen aus Granitquadranten von je 0,5 m Breite, senkrecht zur Gewölbestirne gemessen, welche dicht neben einander versetzt sind. Dieselben sind mit cylindrischen, 0,1 m breiten polirten Berührungsflächen versehen (Abb. 7 der Anlage), zwischen welchen sich Bleieinlagen von 5 mm Stärke befinden. Zwischen die Bleieinlagen und die

Quader sind Kupferbleche eingelegt zur Verhinderung des Eindringens des Bleies in die Poren der Steine. Die an den Stirnen befindlichen Quader sind wie die Gewölbestirnen profilirt. Die Quader wurden vor dem Versetzen nach Einlage des Bleies mit eisernen Schraubenbolzen fest verschraubt und diese Bolzen erst vor dem Ausschalen des Gewölbes entfernt.

Die Abmessungen der Brücke nach der Ausführung sind die folgenden:

Lichtweite zwischen den Widerlagergelenken . . .	30,00 m
Pfeilhöhe des Bogens, zwischen den Gelenken gemessen . . . . .	3,00 „
Ganze Weite zwischen Fundament-Vorderkanten . . .	33,05 „
Nutzbare Breite der Brücke . . . . .	4,00 „

Die Formen der Brücke gehen hervor aus den Abbildungen der Anlage sowie aus der Text-Abb. 1, in der ein vom linken Ufer aus (flussabwärts gesehen) aufgenommenes Lichtbild wiedergegeben ist. Zur Vermeidung der bei Betonbauten häufig auftretenden Flecken und um das Ganze mit den Gelenken in Uebereinstimmung zu bringen, sind sämtliche sichtbaren Außenflächen mit Ausnahme der Gewölbeleibungen in Granitnachbildung ausgeführt. Zu diesem Zweck wurde zugleich mit dem anderen Beton an den Außenflächen eine Mischung von 1 Theil Cement und 3 Theilen geschroteter Steintrümmer des Weissen Jura E und von blauen Kalken (Kiesel der Gletschermoränen Oberschwabens) eingestampft in einer Stärke bis zu 10 cm. Längstens binnen 12 Stunden nach dem Einstampfen wurden die dabei benutzten Lehren entfernt und die Flächen mit Wasser

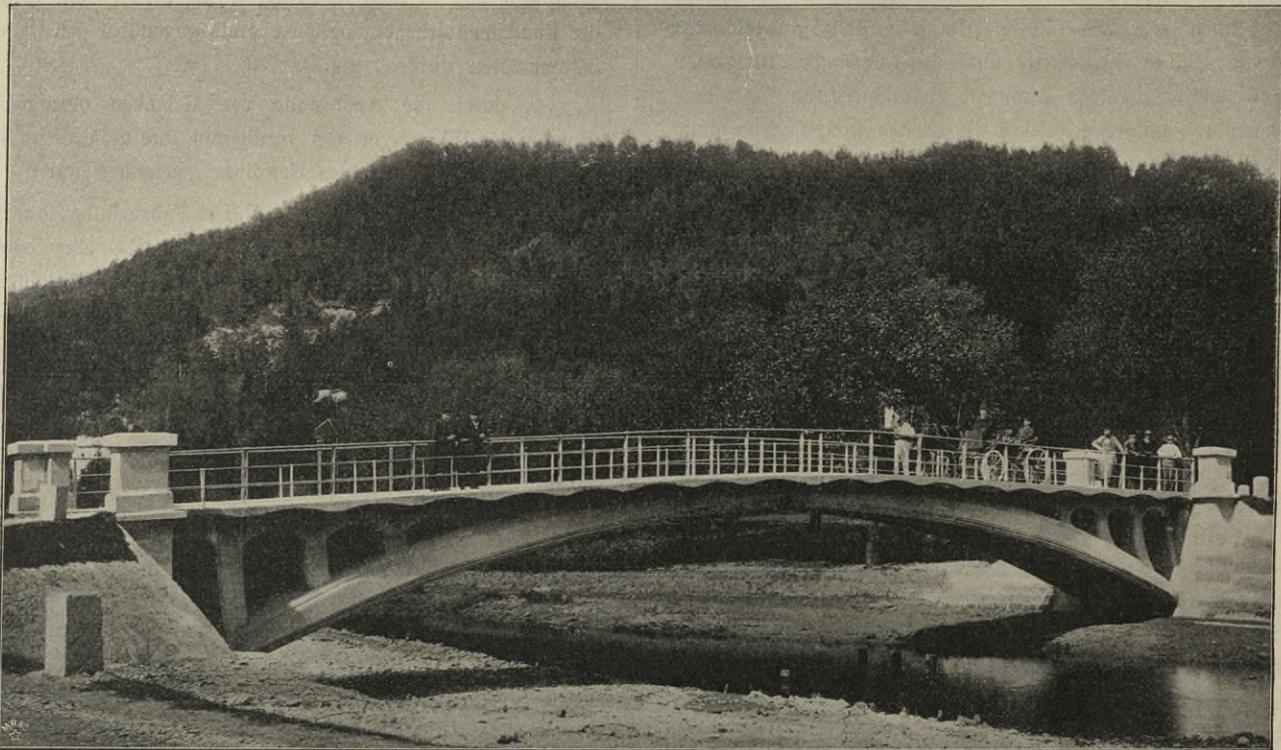


Abb. 1.

Fahrbahnbreite . . . . .	2,50 m
Gehwege, auf Belageisen vorgekragt . . . . .	$2 \times 0,75$ „
Gewölbbreite im Scheitel . . . . .	2,50 „
„ an den Kämpfern . . . . .	3,50 „
Gewölbestärke im Scheitel . . . . .	0,45 „
„ an den Kämpfern . . . . .	0,50 „
„ in der Bruchfuge . . . . .	0,80 „
Stärke der Gelenkquader an der Berührungsfläche	0,10 „

Die Berechnung der Brücke geschah unter Annahme einer Belastung durch eine Dampfwalze von 15 t Gewicht und Menschengedränge mit 360 kg für 1 qm und derart, dafs für jeden Querschnitt des Gewölbes die ungünstigste Lage und Gröfse der beweglichen Last und damit die gröfste Inanspruchnahme des Querschnittes und dessen Abmessungen bestimmt wurden. Diese Berechnung ist übrigens gleich derjenigen der Inzigkofler Brücke aufgestellt worden, sodafs ein weiteres Eingehen hierauf unnöthig erscheint. Die Abmessungen des Gewölbes wurden dabei so gewählt, dafs als gröfste Inanspruchnahme in sämtlichen Querschnitten 34 at Druck und 4 at Zug zugelassen wurden.

und Bürste abgerieben, wodurch der Cement an der Außenhaut entfernt und ein granitähnliches, poriges Gefüge an den Sichtflächen erzeugt wurde. Die Granitnachbildung ist als sehr gelungen zu bezeichnen und wirkt vollkommen täuschend derart, dafs die Grenze zwischen natürlichem und künstlichem Granit nur schwer erkennbar ist.

Die Cementproben ergaben als Zugfestigkeit:

a) für die siebentägige Probe aus je 6 Versuchen 14,65; 14,58; 16,12 kg; im grofsen Mittel somit 15,12 kg,

und für besonders feine Mahlung, wie sie bei dem Gewölbe verwandt ist, 21,84 kg;

b) für die 28 tägige Probe aus je 6 Versuchen 22,60; 25,06; 23,80 kg; im grofsen Mittel somit 23,82 kg,

und für besonders feine Mahlung 30,03 und 27,41 kg, also im Mittel 28,72 kg.

Das auf Sandtöpfen aufgestellte Lehrgerüst wurde am 15. September 1896, d. h. 24 Tage nach Fertigstellung des Gewölbes abgelassen, und dabei wurden die folgenden Senkungen am Scheitel des Gewölbes mittels zehnfacher Uebersetzung gemessen.

Monat	Tag	Stunde	Luft- wärme °Cels.	Scheitel- bewegung flufs-		Monat	Tag	Stunde	Luft- wärme °Cels.	Scheitel- bewegung flufs-		
				auf- wärts	ab- wärts					auf- wärts	ab- wärts	
September 1896	15.	7 Vm.	—	15,4	14,8	September 1896	21.	12 M.	17,5	23,0	19,2	
				(nach der Ab- lassung)								
	16.	12 M.	—	18,2	17,0			22.	6 Nm.	8,8	23,0	20,0
	17.	6 Nm.	—	18,8	17,2				7 Vm.	8,8	25,0	18,0
	18.	7 Vm.	17,5	18,8	18,4				12 M.	20,0	26,0	18,0
		12 M.	33,8	20,2	17,6			23.	6 Nm.	13,8	27,0	19,0
		6 Nm.	17,5	18,8	17,4				7 Vm.	15,0	28,0	20,0
	19.	7 Vm.	12,5	18,8	17,6				12 M.	22,5	28,0	23,0
		12 M.	21,3	19,6	17,0			24.	6 Nm.	13,8	26,0	22,0
		6 Nm.	10,0	18,8	17,0				7 Vm.	7,5	25,5	21,0
20.	7 Vm.	7,5	19,2	18,0		25.	12 M.	10,0	27,0	21,5		
	12 M.	15,0	19,8	18,0			6 Nm.	5,0	27,0	21,5		
	6 Nm.	8,8	20,4	18,6			7 Vm.	5,0	29,0	22,5		
	7 Vm.	7,5	21,4	19,0			12 M.	13,8	30,0	23,0		
							6 Nm.	8,8	30,0	23,0		
							7 Vm.	8,8	30,0	26,0		

Bei dem Ablassen wurden kleine Bewegungen der Widerlager festgestellt; am linken Widerlager, dem auf Pfähle gegründeten, wurde flusaufwärts 1,4 mm, flusabwärts 0,2 mm wagerechte Ausweichung gemessen, während am rechten Widerlager (Gründung unmittelbar auf dem Kiesboden) flusaufwärts keine Bewegung stattfand und flusabwärts eine kleine Ausweichung von 0,5 mm gefunden wurde. Lothrechte Bewegungen waren nicht zu erkennen. Da jedoch von der zweiten Ablesung an (am 16. September 1896) keine Zunahme der Bewegung, trotz sorgfältigster Ueberwachung, zu verzeichnen war, so war kein Anlass zu Befürchtungen in betreff der Standfestigkeit der Widerlager geboten.

Die Beobachtung, dafs der Scheitel noch nach dem Ablassen des Lehrgerüsts sich weiter gesenkt hat, weist darauf hin, dafs bei der Berechnung der Scheitelsenkung nicht blofs die Luftwärme und die Elasticität des Betons (sich Bach, Zeitschrift Deutscher Ingenieure, 1895 Nr. 17) in Rechnung zu stellen ist, sondern eine weitere Volumenveränderung. Diese rührt zweifellos zum Theile davon her, dafs der Beton bei andauernder Belastung eine weitere Zusammendrückung erfährt, als bei gleicher vorübergehender Belastung, sowie davon, dafs der Beton in der ersten Zeit der Erhärtung infolge der chemischen Vorgänge und durch mechanische Verdunstung der Feuchtigkeit sich zusammenzieht. Inwieweit dies geschieht, sollte durch weitere Versuche im Laboratorium, vor allem aber durch wissenschaftlich scharfe Beobachtung der ausgeführten Betongewölbe geschehen. Diese Beobachtung ist unerlässlich, wenn man zu sicheren Ergebnissen über die zu erwartende Senkung gelangen will, da die Senkung nach dem Ablassen gröfser ist als während des Ablassens. Die letztere beträgt bei der Brücke in Inzigkofen mit 43 m Spannweite nur 7,5 mm; bei der Brücke in Munderkingen mit 50 m Spannweite während des zweimaligen Ablassens 52 mm und bei der Brücke in Imnau mit 30 m Spannweite 15 mm. Die weiteren Senkungen nach dem Ablassen betragen in

Inzigkofen	Munderkingen	Imnau
30 mm	70 mm	15 mm.

Diese nachträglichen Senkungen lehren, wie höchst bedenklich es ist, bei Brücken, an denen die Gelenke nicht offen bleiben sollen, dieselben bald nach dem Ablassen zu schliessen. Es sollte dies erst, nachdem die erwähnten Volumenveränderungen zur Ruhe gekommen sind, also jedenfalls erst einige Monate nach dem Ablassen, geschehen. Bei gröfseren Spannweiten hat das Schliessen der Gelenke durch blofses Ausbetoniren überhaupt

Bedenken, da die Bewegungen grofser Gewölbe bei wechselnden Temperaturen und Belastungen sehr bemerkbar sind; es ist kaum anzunehmen, dafs der Druck nach dem Schliessen der Gelenke sich gleichmäfsig auf die Fugen vertheilt; der Druck wird sich im wesentlichen doch durch die Gelenke übertragen, und das Schliessen der Gelenke wird nur zur Folge haben, dafs Spannungen auftreten, die sich der Berechnung entziehen.

Nachdem vom 26. September bis 9. October 1896 nach den Beobachtungen keine weiteren Senkungen des Scheitels verzeichnet werden konnten, wurde am 9. October nach Fertigstellung der Zufahrtsrampen und der Pflasterung der Böschungskegel die Probelastung wie folgt vorgenommen:

1. Leere Pferdestrafsenwalze im Gewicht von 3,5 t auf dem Scheitel; Scheitelsenkung flusaufwärts 0,9 mm; flusabwärts 0,8 mm, welche nach Entlastung ganz verschwanden.

2. Belastete Strafsenwalze von 7 t Gewicht mit 6 Pferden Bespannung; Scheitelsenkung flusaufwärts 1,3 mm; flusabwärts 1,2 mm, bei Entlastung ganz zurückgegangen.

3. Gleichmäfsige Belastung der Fahrbahn zwischen den Gehwegen mit 11 cbm Packlagesteinen auf die mittleren  $\frac{2}{3}$  der Spannweite, entsprechend einem Gesamtgewicht von 20 t; Scheitelsenkung flusaufwärts 1,8 mm; flusabwärts 1,6 mm.

Diese Last blieb über Nacht auf der Brücke; am folgenden Morgen wurde die Senkung zu 4 mm festgestellt.

Die Brücke wurde sodann auf die Länge von 27 m, gegen den Scheitel hin stärker, durch weiteres Aufbringen von 5 cbm Steinen belastet. Die Gesamtlast betrug rund 30 t, was einer Einheitsbelastung von 440 kg/qm belasteter Fläche gleichkommt. Die Scheitelsenkung war gewachsen flusaufwärts auf 4,7 mm und flusabwärts auf 4,5 mm. Nach Entlastung der Brücke hob sich der Scheitel wieder um 1 mm, sodafs die dauernde Senkung rund 3,6 mm beträgt.

Die Beobachtungen sind vorgekommener unbefugter Berührung der Zeigerwerke wegen nicht als zuverlässig anzusehen. Die wirklichen Bewegungen müssen kleiner gewesen sein, da sonst die Scheitelsenkung mit Rücksicht auf die Elasticität des Gewölbe- und Widerlagerbetons thatsächlich hätte gröfser werden müssen, als nach der zuverlässigen ersten Scheitelbeobachtung sich gezeigt hat.

Eine Probelastung mit der Dampfwalze und der der Berechnung zu Grunde gelegten gleichmäfsig vertheilten Last von 43 t bleibt bis nach längerer Erhärtung des Betons vorbehalten.

Für die Brücke waren erforderlich:

Gründungsbeton . . .	189,6 cbm (72,5 + 117,1)	} zusammen 311,55 cbm Mauerwerk.
Gewölbebeton . . .	60,4 „	
Pfeilerbeton . . .	9,0 „	
Fahrbahntafel . . .	15,4 „	
Gehwege . . . . .	7,85 „	
Ortpfeiler . . . . .	21,3 „	
Aufbauten . . . . .	3,5 „	
Gelenkquader . . . . .	4,5 „	
Lehrgerüst Kantholz . . .	12,3 „	
„ Pfähle . . . . .	4,0 „	
Dielenbelag . . . . .	127 qm.	
Geländer . . . . .	1500 kg.	
Blei- und Kupferbleche . .	54 kg.	

Ueber die Ausführungskosten geben folgende Einzelheiten Aufschluss:

Sächliche Gesamtkosten: 13800 *M*, d. h. 113 *M* für 1 qm nutzbare Brückenfläche zwischen den Ortpfeilern.

Sand: es wurde nur ganz reiner Quarzsand des Buntsandsteins von Schenkzell im Kinzigthal zugelassen; frei Baustelle 9  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Cement: langsam bindender (Bindezeit 7 Stunden) von der Firma „Stuttgarter Cementfabrik in Blaubeuren“; frei Bahnhof Eyach 3,70  $\mathcal{M}$  f. 100 kg.

Steinschlag (Muschelkalk des Eyachthales): Ring von 4 cm; frei Baustelle 3  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Granitgelenke: Bergmaiersche Brüche bei Edenstetten, Bayer. Wald; frei Bahnhof Eyach 150  $\mathcal{M}$  f. d. cbm bearbeitet.

Gründungsbeton 1 : 3 : 6 ( $\frac{1}{5}$  gröfsere Einlagesteine); 17,60  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Gewölbebeton 1 : 2,5 : 5, einschl. Lehrgerüste und Stirnschablonen; 45,30  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Pfeiler- und Fahrbahnkastenbeton 1 : 2,5 : 5; 31,30  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Gehwegplatten 1 : 2 : 4 (Ueberzug von Cementmörtel 1 : 3); 38  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Ortpfeilerbeton 1 : 3 : 6; 29,50  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Gurtplatten der Ortpfeiler und Brüstungsquader 1 : 2 : 4; 43  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Zulage für die Granitnachbildung der äufseren Flächen der Gewölbe usw. (auf 10 cm Tiefe berechnet); 30  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Versetzen der Gelenkquader; 15  $\mathcal{M}$  f. d. cbm.

Kupfer-Bleieinlagen: 1  $\mathcal{M}$  f. 1 kg.

Die ganze Bauarbeit hat  $3\frac{1}{2}$  Monate in Anspruch genommen, wovon auf die Betonirung etwa  $1\frac{1}{2}$  Monate kommen. Das Gewölbe wurde in fünf Tagen fertiggestellt. Die Herstellung der Gehwege, Postamente, Böschungskegel, Rampen usw. erforderte 17 Tage. Die Brücke wurde am 5. November 1896 landespolizeilich abgenommen und dem Verkehr übergeben. Die Arbeiten, mit Ausnahme der Uferschutzbauten und der Zufahrtsrampen, wurden durch die Firma B. Liebold u. Co. in Holzminden für die runde Summe von 12300  $\mathcal{M}$  ausgeführt. Der gesamte Bau nebst Brückenrampen und Bauleitung kostete 18000  $\mathcal{M}$ . Der Entwurf sowie die Bauleitung wurde vom Landesbaurath M. Leibbrand in Sigmaringen besorgt. Die örtliche Leitung hatte für den Unternehmer Jean Mayer aus Holzminden, für die Bauverwaltung Werkmeister C. Schäfer aus Haigerloch.

Die **Versuche**, von denen oben schon die Rede war, hatten sich zu erstrecken

1. auf die Ermittlung der rückwirkenden Festigkeit des Granits mit Rücksicht auf die mögliche Zertrümmerung der Gelenkquader an den einem sehr hohen Druck (150 at) ausgesetzten Berührungsflächen;

2. auf die Ermittlung der Biegefestigkeit mit Bezug auf die in den Gelenkquadern auftretende Biegung, hervorgerufen durch die auf die gewölbeartige Fugenfläche der Granitquader wirkende gleichmäfsig vertheilte Belastung und den in der Gelenkfläche wirkenden concentrirten Gegendruck;

3. auf die Ermittlung der Schubfestigkeit mit Rücksicht auf die in den cylinderabschnittförmigen Gelenktheilen und in deren Nähe bei einseitiger Belastung der Brücke auftretenden senkrechten Scherkräfte;

4. auf die Ermittlung des Elasticitätscoefficienten für Granit;

5. auf die Ermittlung der Formänderung der Gelenkquader behufs Gewinnung eines Urtheils über die in denselben auftretenden Spannungen;

6. auf das Verhalten der Bleieinlagen und die durch dieselben ermöglichten Drehungen der Gelenke.

Aus den Ergebnissen über diese bemerkenswerthen Versuche sei hier folgendes mitgetheilt. Die Versuche erstrecken sich

a) an der Materialprüfungsanstalt der Kgl. Technischen Hochschule in Stuttgart auf die Ermittlung der Zug-, Druck- und Biegefestigkeit und der Elasticität;

b) an dem Mechanisch-Technischen Laboratorium der Kgl. Technischen Hochschule in München auf die Ermittlung der Druckfestigkeit des verwandten Granites, der Formveränderungen der Gelenkquader und des Verhaltens der Bleizwischenlage.

Der Granit stammte aus den Brüchen der Firma M. Bergmaier u. Co. in München, welche sich in Edenstetten, Kgl. bayerisch. Bezirksamt Deggendorf im Bayerischen Walde befinden. Der Granit, der zu den Versuchen diente, ist als feinkörniger, hellgrauer, sogen. blauer Granit bezeichnet.

Die unter a) genannten Versuche sind von dem Vorstand der Stuttgarter Materialprüfungsanstalt, Baudirector v. Bach, in Uebereinstimmung mit Landesbaurath Leibbrand, veröffentlicht worden, und zwar im Hefte Nr. 9 des Bandes XLI der Zeitschrift Deutscher Ingenieure v. 27. Februar 1897. Da die Zeitschrift den Lesern dieses Aufsatzes jedenfalls zur Verfügung steht, so begnügen wir uns hier damit, nur die hauptsächlichsten Ergebnisse zu wiederholen, um ein zusammenfassendes Bild der verschiedenen Versuche zu gewinnen.

#### I. Versuche der Stuttgarter Materialprüfungsanstalt.

Als Versuchskörper wurden die folgenden verwandt:

- Körper von der Form nach Text-Abb. 2;
- Kreiscylindrische Körper;
- Prismatische Stäbe.

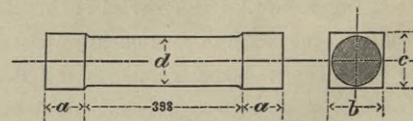


Abb. 2.

1. Bestimmung der Schubfestigkeit aus Drehungsversuchen, denn nur mit solchen ist reine Schub-Inanspruchnahme zu erzielen (siehe Bach, Elasticität und Festigkeit).

Die Dimensionen der zwei Versuchskörper betragen:

	Körper I.	Körper II.
Durchmesser $d$ (Mittel aus 6 Ablesungen) . . .	127,8 mm	127,7 mm
Gewicht . . . . .	22,8 kg	22,92 kg
Volumen, berechnet nach den Abmessungen . . .	8,65 edm	8,52 edm
Gewicht der Volumeneinheit = $\frac{\text{Gewicht}}{\text{Volumen}}$ . . .	2,64	2,69

Die Köpfe der Versuchskörper besaßen folgende Abmessungen:

	a = 81,5 mm	81,0 mm	81,0 mm	80,0 mm
b = 147,4 "	146,5 "	146,7 "	144,3 "	
c = 143,8 "	143,0 "	146,4 "	144,7 "	
Drehungsmoment $M_d$ in kg-cm, welches den Bruch herbeiführte . . . . .		32500		31000
Schubspannung, welche diesem Drehungsmomente entspricht, nach Maßgabe der Gleichung				
$K_d = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{M_d}{d^3}$ : $K_d = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{32500}{12,78^3} = 79,3$				$\frac{16}{\pi} \cdot \frac{31000}{12,77^3} = 75,8$
Schubfestigkeit im Mittel . . . . .				77,6 kg/qcm.

2. Bestimmung der Druckfestigkeit. Diese erfolgte durch Druckversuche mit vier Würfeln, die aus den Köpfen der unter 1. genannten Versuchskörper herausgearbeitet waren. Die Druckflächen der Würfel waren behufs Herstellung paralleler Flächen mittels Diamanten gehobelt worden. Die Würfel Ia und Ib entstammten dem Körper I, die Würfel IIa und IIb dem Körper II.

Die Ergebnisse sind die folgenden:

Bezeichnung	Gewicht <i>G</i> kg	Abmessungen			Volumen <i>abh</i> ccm	Spec. Gew. $\frac{1000 G}{abh}$	Querschnitt <i>ab</i> qcm	Bruchbelastung	
		Seite <i>a</i> cm	Seite <i>b</i> cm	Höhe <i>h</i> cm				beobachtet	auf 1 qcm
Ia	0,539	5,94	5,96	5,88	208	2,59	35,4	35 000	989
Ib	0,546	5,94	6,00	5,90	210	2,60	35,6	34 950	982
IIa	0,542	5,93	5,98	5,90	209	2,59	35,5	40 800	1149
IIb	0,543	5,97	5,98	5,92	211	2,58	35,7	33 200	903

somit Druckfestigkeit im Mittel 1006.

3. Bestimmung der Druckelastizität. Hierzu wurden zwei kreiszylindrische Körper von rund 21,5 cm Durchmesser und 105 cm Höhe verwandt.

Granitcylinder I:

- Mittl. Durchmesser . . . . . 21,5 cm,
- „ Querschnitt . . . . . 363,1 qcm,
- Höhe, Stirnflächen gehobelt . . . . . 105,05 cm,
- Gewicht . . . . . 100,83 kg,
- Gewicht der Raumeinheit =  $\frac{\text{Gewicht}}{\text{Volumen}}$  2,64 kg.

Es wurden drei Versuche vorgenommen, sodafs in jeder dieser Versuchsreihen die Belastung zwischen 0 und  $P = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50$  und 60 Tonnen so oft gewechselt wurde, bis die Zusammendrückungen sich nicht mehr änderten. Der Zeitraum zwischen je zwei Abmessungen wurde zu 1,5 Minuten festgesetzt, um der namentlich bei den höheren Belastungen Einfluss habenden, elastischen Nachwirkung Rechnung zu tragen. Je gröfser die Belastungen werden, desto häufiger mufs die Be- und Entlastung vorgenommen werden, um die gleiche Federung zu erhalten, z. B. bei 5 t (0—13,8 kg/qcm) dreimaliger Wechsel; bei 10 t (0—27,5 kg/qcm) sechsmaliger Wechsel; bei 25 t (0—68,9 kg/qcm) neunmaliger Wechsel; bei 60 t (0—165,2 kg/qcm) elfmaliger Wechsel, wobei die gleiche Federung noch nicht erzielt war.

Die Zusammendrückungen auf 75 cm Länge für die drei Versuchsreihen sind in folgender Tabelle enthalten:

Belastungen		Zusammendrückungen auf 75 cm Länge in $\frac{1}{600}$ cm									
		gesamte			bleibende			federnde			
		gesamte kg	kg/qcm	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	Versuch	
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
			13. 6. 96	16. 6. 96	26. 6. 96	13. 6. 96	16. 6. 96	26. 6. 96	13. 6. 96	16. 6. 96	26. 6. 96
5 000	0 — 13,8		3,98	4,04	3,99	0,48	0,29	0,25	3,50	3,75	3,74
10 000	0 — 27,5		9,17	8,93	9,14	1,41	0,41	0,47	7,76	8,52	8,67
15 000	0 — 41,3		14,40	13,91	14,29	2,31	0,46	0,60	12,09	13,45	13,69
20 000	0 — 55,1		19,62	18,65	19,03	3,16	0,49	0,68	16,46	18,16	18,35
25 000	0 — 68,9		25,02	23,13	—	4,21	0,56	—	20,81	22,57	—
30 000	0 — 82,6		29,89	27,19	27,67	4,98	0,59	0,87	24,91	26,60	26,80
40 000	0 — 110,2		39,74	34,66	34,93	6,88	0,71	0,97	32,86	33,95	33,96
50 000	0 — 137,7		48,39	41,11	41,30	8,36	0,90	1,20	40,03	40,21	40,10
60 000	0 — 165,2		57,12	47,31	47,23	10,03	1,35	1,50	47,09	45,96	45,73
bei Temperaturen (° Cels.) von			19,9—20,2°	21,7—22,0°	19,2—19,3°						

Die beiden Text-Abb. 3 u. 4 geben die Zusammendrückungen zeichnerisch für die Versuche 1 und 3, welch letzterer gewählt wurde, da er die geringste Temperaturschwankung aufwies und somit auch die gröfseren Genauigkeit besitzen dürfte.

Es ist naturgemäfs, dafs die bleibenden Zusammendrückungen bei den beiden letzten Versuchen kleiner sind als die des ersten Versuches; ferner ist es auch in der Verschiedenheit des Zeitabstandes der einzelnen Versuche begründet, dafs der dritte Versuch infolge der zehntägigen Ruhepause gröfsere Zusammendrückungen ergab als der zweite.

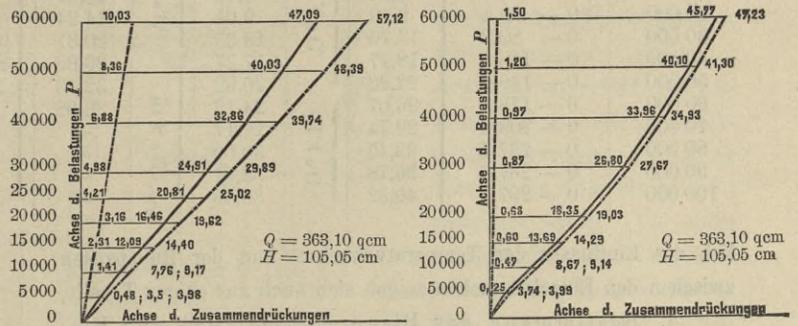


Abb. 3. Versuch 1.  
13. Juni 1896. 19,9—20,2° C.

Abb. 4. Versuch 3.  
26. Juni 1896. 19,2—19,3° C.

--- } Linien der { bleibenden }  
 - - - } { federnden }  
 - - - } { gesamten } Zusammendrückungen.

Granitcylinder II:

- Mittl. Durchmesser . . . . . 20,7 cm,
- „ Querschnitt . . . . . 336,5 qcm,
- Höhe, Stirnflächen gehobelt . . . . . 105,0 cm,
- Gewicht . . . . . 93,9 kg,
- Gewicht der Raumeinheit . . . . . 2,66 kg.

Auch hier wurden drei Versuche ausgeführt, und zwar Versuche 1 und 2 bis  $P = 100 000$  kg, während bei Versuch 3 nur bis 60 000 kg gegangen wurde.

Die Mefslänge betrug: für die Versuche 1 und 2 50 cm,  
für den Versuch 3 . . . 75 cm.

(Sich Tabelle Seite 8.)

Auch hier zeigte sich wie beim Granitcylinder I die Eigentümlichkeit, dafs anfänglich stärkeres Wachsen der Zusammendrückungen erfolgt als der Spannungen und später langsamere Zunahme als bei letzteren, dafs also ein Wendepunkt innerhalb des Gebietes der Druckspannungen besteht. Die beim Granitcylinder I gemachten Erfahrungen bezüg-

Belastungen		Zusammendrückeungen in $\frac{1}{600}$ cm											
		gesamte				bleibende			federnde				
		Versuch 1	Temperatur	Versuch 2	Temperatur	Versuch 3	Temperatur	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
kg	kg/qcm	18. 6. 96		19. 6. 96		25. 6. 96		18. 6. 96	19. 6. 96	25. 6. 96	18. 6. 96	19. 6. 96	25. 6. 96
5 000	0 — 14,9	2,04	21,6 ° C.	2,00	21,7 ° C.	3,11	20,6 ° C.	0,27	0,10	0,22	1,77	1,90	2,89
10 000	0 — 29,7	4,41		4,40		6,88		0,56	0,13	0,38	3,85	4,27	6,50
15 000	0 — 44,6	6,84		6,71		10,61		0,87	0,13	0,47	5,97	6,58	10,14
20 000	0 — 59,4	9,19	9,01	14,24	1,18	0,13	0,49	8,01	8,88	13,75			
30 000	0 — 89,2	13,76	13,35	20,81	1,73	0,16	0,59	12,03	13,19	20,22			
40 000	0 — 118,9	18,17	17,27	26,69	2,31	0,18	0,69	15,86	17,09	26,00			
50 000	0 — 148,6	22,22	20,82	32,13	2,75	0,20	0,83	19,47	20,62	31,30			
60 000	0 — 178,3	26,07	24,13	36,98	3,19	0,23	0,98	22,88	23,90	36,00			
70 000	0 — 208,0	29,74	27,17	—	3,66	0,23	—	26,08	26,94	—			
80 000	0 — 237,7	33,45	30,00	—	4,10	0,30	—	29,35	29,70	—			
90 000	0 — 267,5	36,78	32,01	—	4,50	0,38	—	32,28	32,53	—			
100 000	0 — 297,2	40,32	35,68	—	5,00	0,53	—	35,32	35,15	—			

lich des Einflusses der Temperaturwechsel und der Ruhepausen zwischen den Einzelversuchen zeigen sich auch aus obiger Tabelle.

4. Bestimmung der Biegeelastizität und Biegefestigkeit. Die zur Ermittlung der Druckelastizität

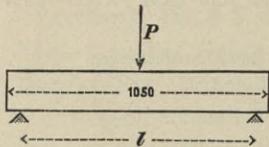


Abb. 5.

unter 3 verwandten zwei Cylinder wurden durch Abarbeiten in rechteckige Prismen verwandelt und diese Balken der Biegeprobe nach der Text-Abb. 5

unterworfen; es ist zu bemerken, dass diese Körper schon vorher auf Druck beansprucht worden waren.

Die Abmessungen waren die folgenden ( $a$  = Balkenlänge):

	I.			II.		
	$a$	$b$	$h$	$a$	$b$	$h$
Masse . . . . .	1050,5	147,6	149,8 mm	1050,0	146,2	146,6 mm
Gewicht . . . . .		60,14 kg			58,65 kg	
Volumen $abh$ . .		23,23 cdm			22,50 cdm	
Gewicht der Volumeneinheit . .		2,59 kg			2,60 kg.	

Die Belastung wurde auch hier zwischen  $P_{min}$  und  $P_{max}$  gewechselt, wobei jedoch  $P_{min}$  nicht = 0 gesetzt wurde, da bei der Anfangsbelastung = 0 die Wiederherbeiführung des Anfangszustandes nicht mit befriedigender Genauigkeit zu erreichen ist. Es wurde  $P_{min}$  = 300 kg angenommen.

Der Dehnungscoeffizient = 1 : Elastizitätsmodul für Granit ergibt sich auf Grund dieser Versuche nach den Formeln: ohne Rücksicht auf die Schubkraft

$$1) \text{ Durchbiegung } \eta' = \frac{Pa l^3}{\Theta 48} = 0,25 Pa \frac{l^3}{bh^3},$$

mit Rücksicht auf die Schubkraft

$$2) \text{ Durchbiegung } \eta' + \eta'' = \alpha \frac{P}{bh} l \left\{ 0,25 \left( \frac{l}{h} \right)^2 + 0,78 \right\}$$

für den Balken I	nach 1)	nach 2)
zwischen $P = 300$ und $800$ kg	$\frac{1}{142000}$	$\frac{1}{151000}$
$\sigma_b = \frac{Pl}{4} \cdot \frac{6}{bh^2} = 13,6$ und $36,2$ kg/qcm		
zwischen $P = 300$ und $1300$ kg	$\frac{1}{118000}$	$\frac{1}{126000}$
$\sigma_b = 13,6$ und $58,9$ kg/qcm		
für den Balken II	$\frac{1}{187000}$	$\frac{1}{200000}$
für $\sigma_b = 14,3$ und $28,7$ kg/qcm		
14,3 " 43,0 "	$\frac{1}{185000}$	$\frac{1}{197000}$
14,3 " 57,3 "	$\frac{1}{177000}$	$\frac{1}{189000}$
14,3 " 71,6 "	$\frac{1}{165000}$	$\frac{1}{176000}$
14,3 " 85,9 "	$\frac{1}{157000}$	$\frac{1}{168000}$

1. Versuchsreihe.  
Entfernung  $l$  der Auflager . . . . .  
Bruchbelastung  $P$  . . . . .  
Biegefestigkeit, welche dieser Bruchbelastung entspricht nach der Gleichung

$$K_b = \frac{M_b}{\frac{1}{6}bh^2} = \frac{\frac{Pl}{4}}{\frac{1}{6}bh^2}$$

Bruchquerschnitt . . . . .  
somit hiernach Biegefestigkeit . . . . .

Mittel

2. Versuchsreihe.  
Entfernung  $l$  des Auflagers . . . . .  
Bruchbelastung  $P$  . . . . .  
Biegefestigkeit, welche dieser Bruchbelastung entspricht . . . . .  
Bruchquerschnitt . . . . .  
somit hiernach Biegefestigkeit . . . . .

Mittel

I. Balken.  
3. 8. 1896; 18,2 — 18,5 ° C.  
1000 mm  
1800 kg  
 $K_b = \frac{1800 \cdot 100 \cdot 6}{4 \cdot 14,76 \cdot 14,98^2} = 81,5$  kg/qcm  
 $b = 147,0$ ;  $h = 149,6$  mm  
 $\frac{1800 \cdot 100 \cdot 6}{4 \cdot 14,7 \cdot 14,96^2} = 82,1$  kg/qcm  
**83,8 kg/qcm.**

II. Balken.  
4. 8. 1896; 18,8 — 20,4 ° C.  
1000 mm  
1800 kg  
 $\frac{1800 \cdot 100 \cdot 6}{4 \cdot 14,62 \cdot 14,66^2} = 85,9$  kg/qcm  
 $b = 145,9$ ;  $h = 147,1$  mm  
 $\frac{1800 \cdot 100 \cdot 6}{4 \cdot 14,59 \cdot 14,71^2} = 85,5$  kg/qcm

500 mm  
4180 kg  
 $K_b = \frac{4180 \cdot 50 \cdot 6}{4 \cdot 14,76 \cdot 14,98^2} = 95,5$  kg/qcm  
 $b = 146,2$ ;  $h = 150,0$  mm  
 $\frac{4180 \cdot 50 \cdot 6}{4 \cdot 14,62 \cdot 15,00^2} = 95,3$  kg/qcm  
**104,1 kg/qcm.**

500 mm  
4700 kg  
 $\frac{4700 \cdot 50 \cdot 6}{4 \cdot 14,62 \cdot 14,66^2} = 112,2$  kg/qcm  
 $b = 145,8$ ;  $h = 146,9$  mm  
 $\frac{4700 \cdot 50 \cdot 6}{4 \cdot 14,58 \cdot 14,69^2} = 112,9$  kg/qcm

Der obengenannten Arbeit v. Bachs ist die folgende Zusammenstellung über die Festigkeiten des Granits entnommen, welcher die entsprechenden Zahlen für ein zähes, graues Gufseisen (bearbeitet, also ohne Gufshaut) gegenübergestellt sind.

	Granit	Gufseisen
	kg/qcm	kg/qcm
Druckfestigkeit im Durchschnitt	1006	7510 (Würfel),
Biegungsfestigkeit . . . . .	83,8	2765 (quadr. Stab),
Schubfestigkeit (Drehungsversuch)	77,6	1680 (Kreisylind.),
Zugfestigkeit . . . . .	45,4	1560.

Bei beiden Materialien wachsen die Dehnungen schneller als die Spannungen.

Bach hat ferner auf Grund der oben angeführten Versuche unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate zur Bestimmung der Coefficienten für Spannungen bis 40 kg/qcm, allerdings mit anderem Granit als dem zu den Versuchen verwandten, folgende Werthe gefunden als Mittel und in abgerundeten Zahlen:

$$\text{für Druck } E = \frac{1}{300000} \sigma^{1,12}$$

$$\text{für Zug } E = \frac{1}{240000} \sigma^{1,4}.$$

Erst weitere Versuche werden aber über die Anwendbarkeit dieser Zahlen als allgemeingültige Mittelwerthe entscheiden können, da die Beschaffenheit des Granits eine sehr verschiedene sein kann. Nach den v. Bachschen Erfahrungen würde der Glimmergehalt des Granits einen bedeutenden Einfluss auf die Elasticität desselben ausüben.

**II. Versuche des Mechanisch-Technischen Laboratoriums in München.**

Die Versuchskörper stammten, wie die zu den Versuchen zu I verwandten, ebenfalls aus den Edenstettener Brüchen der Granitwerke Bergmaier u. Co.

Zunächst wurde die Druckfestigkeit dieser Proben aus sechs Würfeln mit folgendem Ergebnis bestimmt:

Nr.	Spec. Gewicht	Druckfestigkeit kg/qcm	Bemerkung
1	2,67	1070	Die Druckflächen waren durch Abdrehung mit Diamanten geebnet worden.
2	2,67	1150	
3	2,68	1140	
4	2,67	1170	
5	2,67	1040	
6	2,67	1050	
<b>Mittel</b>	<b>2,67</b>	<b>1100 kg/qcm.</b>	

Um das Verhalten des Granits im Gewölbe beurtheilen zu können, wurden zwei Körper genau nach den Abmessungen, wie sie an den Gelenken der Brücke verwandt werden sollten, und mit einer Breite von  $\frac{1}{10}$  der Gewölbebreite im Scheitel hergestellt. Die Text-Abb. 6 zeigt die Anordnung des Gelenkes; es ist zu beachten, dass die beiden Gelenkflächen nicht concentrisch, sondern um 2 mm discentrisch sind, wenn die Berührung ohne Bleieinlage erfolgt. Die Unterflächen der Quader waren ziemlich eben, aber ohne besondere Sorgfalt abgerichtet und gestockt. Die Gelenkflächen waren gut polirt. Um nun das gefährliche Einpressen des Bleies in die Poren des Granits zu verhindern, sollte, wie dies auch bei der Brücke selbst geschehen ist, das Blei zwischen 0,1 mm dicke Kupferbleche

gelagert werden. Die Bleiplatte selbst aus Walzweichblei hatte eine Breite von 100 mm, eine Länge von 250 mm entsprechend den Dimensionen des Granitgelenkes und eine Dicke von 3 mm. Da aber kein 0,1 mm dickes Kupferblech zu haben war, wurde

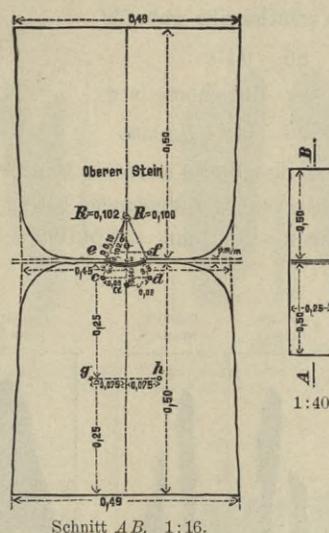


Abb. 6. Probequader.

zu den Versuchen 0,08 mm dickes, blank polirtes Messingblech verwandt. Derartig ausgerichtet wurden die Quader in aufrechter Stellung (Text-Abb. 6) zwischen die ebenen 75 x 75 cm großen gußeisernen Druckplatten der lothrechten Prüfungsmaschine gut centrisch aufgestellt und alsdann einer durch Druckwasser erzeugten Belastung unterworfen, die bis zu 94 t gesteigert wurde. Die obere Druckplatte der Maschine ist im Kugelgelenk beweglich. Die Versuche sollten sich nun erstrecken auf:

- a) das Verhalten der Steine und deren Formveränderungen,
- b) die mögliche Drehung der Gelenke und
- c) das Verhalten der Bleieinlage, namentlich in Bezug auf etwaiges Fließen.

Behufs der Messung der Zusammendrückung der Bleieinlage hatte man in der Achse der Quader auf beiden Seiten, in einem in lothrechter Richtung gemessenen Abstand von je 40 mm vom Scheitel des Gelenktheiles der Quader, an dem mit  $\begin{Bmatrix} a - b \\ a' - b' \end{Bmatrix}$  bezeichneten Punkten kleine Metallmuttern fest in den Stein eingelassen, auf welche man je eine lothrecht gerichtete Zunge aus 2 mm starkem Messingblech aufschraubte, deren freie, zu einer Schneide ausgebildete Enden sich in einem lichten Abstand von etwa 3 mm befanden. Dieser Abstand wurde durch Einführung eines Meßskeiles während verschiedener Belastungszustände der Quader bis auf  $\frac{1}{100}$  mm genau gemessen und dadurch die Zusammendrückung der Bleieinlage gefunden.

Vor Durchführung der Messungen sollte mittels einer Belastung von 4000 kg die Bleieinlage zur satten Anlage gebracht und ebenso ein Einrichten der Druckplatten bewirkt werden. Die weiter unten ersichtlichen Angaben über das Verhalten der Bleieinlage haben ergeben, dass ein sattes Anliegen nicht erreicht wurde. Nach einigen Vorversuchen, welche bezüglich der Genauigkeit bei dem Einstellen des Meßskeiles nicht völlig genügten, wurde die Führung des Keiles durch Anbringung eines zweiten Auflagers verbessert und damit dann vollständig zuverlässige Ergebnisse erzielt. Es ist zu bemerken, dass die ungünstigste Höchstbelastung mit Straßsenwalze und vollständiger Belastung von 360 kg/qm einen Gesamtdruck von 350000 kg auf das 2,5 m lange Scheitelgelenk ergiebt, dass somit der 0,5 m breite Einzelgelenkquader eine Last von 70000 kg zu übertragen hat, entsprechend einer specifischen Belastung von  $\frac{70000}{10 \cdot 50} = 140$  kg/qcm der Gelenkflächen.

Bei der Größe des Versuchsquaders entspricht eine Belastung mit 35 at dem im Gewölbe wirklich auftretenden größten Drucke.

Die erste Versuchsreihe ergab bei Belastungen von 10 15 20 25 30 35 40 t eine Gesamt-Zusammendrückeung der Bleieinlage von 10 13 15 17 18 20 20  $\frac{1}{1000}$  mm.

Eine zweite weitergeführte Versuchsreihe gab für Belastungen von 20 40 60 80 94 t eine Gesamt-Zusammendrückeung der Bleieinlage von 16 21 24 26 29  $\frac{1}{1000}$  mm.

Ein Ausweichen bzw. Fließen des Bleies wurde in keinem Falle bemerkt. Die bleibende Annäherung der Messungen betrug nach der Entlastung der Quader kaum  $2 \times \frac{1}{1000}$  mm = 0,00002 m.

Diese Ergebnisse sind insofern bemerkenswerth, als offenbar infolge der starken Reibung zwischen Bleieinlage und Quader das Blei nicht, wie nach früheren anderweitig vorgenommenen Versuchen zu erwarten gewesen wäre, beim Druck von etwa 120 at zum Weichen kam, sondern sich wie ein elastischer Körper verhielt.

Das Hauptaugenmerk wurde sodann auf Formveränderungen der Quader selbst gerichtet und diese gemessen, vornehmlich in Bezug auf ein etwaiges seitliches Ausweichen des Materials zwischen Druckplatte und Gelenk. Zu diesem Zwecke wurden an den Punkten

$$\left\{ \begin{array}{l} c-d-e-f \\ c'-d'-e'-f' \end{array} \right\}$$

etwa 3 mm weite und 5 mm tiefe Löcher in den Quader gebohrt und in dieselben Eisenzapfen fest eingelassen, die zur Aufnahme und Befestigung von Bauschingerschen Spiegelapparaten dienten. Die Anordnung und Bauart der Bauschingerschen Apparate, wie sie im vorliegenden Falle zur Verwendung kamen, war ganz die nämliche, wie sie im 24. Heft (Seite 9 u. 10) der ganzen Reihe der Mittheilungen aus dem Mech.-Techn. Laboratorium der Techn. Hochschule in München beschrieben ist.

Die Entfernungen zwischen den Meßpunkten  $\left\{ \begin{array}{l} c-d \\ c'-d' \end{array} \right\}$  und  $\left\{ \begin{array}{l} e-f \\ e'-f' \end{array} \right\}$  zu beiden Seiten der Quader betrug je 100 mm.

Am unteren Stein, also nahe der Hohlfläche, ergab die Messung im Mittel für Belastungen

von 10 15 20 25 30 35 40 t.

Gesamt-Verkürzungen der Entfernung der Meßpunkte  $c-d$  und  $c'-d'$

von 9,8 13,3 15,8 17,7 19,0 19,8 20,2  $\frac{1}{1000}$  mm,

welche nach dem Entlasten wieder bis auf 0,2 Tausendstel Millimeter jener 100 mm langen Maßsstrecke zurückgingen.

Dieses Maß von 0,000002 m stellt also die bleibende Verkürzung der Strecke  $c-d$  dar.

Am oberen Stein wurden hervorgebracht durch Belastungen von 10 15 20 25 30 35 40 t Gesamt-Verkürzungen der Entfernung der Meßpunkte  $e-f$  und  $e'-f'$  von 4,9 6,9 8,5 9,6 10,6 11,3 12  $\frac{1}{1000}$  mm, die nach der Entlastung wieder bis auf 1,0 Tausendstel Millimeter — bleibende Verkürzung — verschwanden.

Es lag nahe, diese Formänderung von der Art der Anlage der Steine an die Druckplatte abhängig zu glauben. Man legte somit bei dem zweiten Versuche eine Pappdeckelscheibe von 100 mm auf 250 mm bei, derart, daß sich die Horizontalprojectionen der Scheibe und des Cylinderabschnittes des Gelenkes deckten, und erhielt damit an den Punkten  $\left\{ \begin{array}{l} e-f \\ e'-f' \end{array} \right\}$  für

Belastungen von 10 15 20 25 30 35 40 t Verkürzungen von 4,0 5,9 7,4 8,5 9,4 10,0 10,5  $\frac{1}{1000}$  mm.

Die bei dem ersten Versuch beobachteten Verkürzungen können daher nicht ausschließlich auf eine Biegebungsbeanspruchung zurückgeführt werden, was zunächst am wahrscheinlichsten erschien.

Hierauf wurde der Bauschingersche Meßapparat noch in halber Höhe des unteren Steines in den Punkten  $\left\{ \begin{array}{l} g-h \\ g'-h' \end{array} \right\}$  angebracht.

Die Punkte  $g$  und  $h$  befanden sich in je 75 mm Entfernung von der lothrechten

Achse. Bei diesem Versuche, mit Beibehaltung der Pappdeckelbeilage, ergaben sich für

Belastungen von 10 15 20 25 30 35 40 t Verlängerungen von 3,2 5,5 7,8 10,2 12,6 15,1 17,3  $\frac{1}{1000}$  mm und bei der Wiederholung ohne Pappdeckelbeilage bei Belastungen von 20 40 60 80 t Verlängerungen von 7,0 16,9 26,5 36,9  $\frac{1}{1000}$  mm.

Das Aufquellen der Steine bei dem im Gewölbe auftretenden Drucke von 35 at beträgt sonach im Mittel etwa 14 Tausendstel Millimeter. Bei dem ganz ähnlichen Blankenberger Granit erfolgte nach den Angaben Professor Föppls in den Mittheilungen des Mech.-Techn. Laboratoriums der Bruch erst bei einer Dehnung von 60 Tausendstel Millimeter; hiernach können die Quader ganz erheblich größere als die im Gewölbe auftretenden Pressungen ertragen.

Endlich wurde noch durch eine Beobachtungsreihe die gegenseitige Neigung der Steine, d. h. die Verdrehung des Gelenkes um seine wagerechte Achse festgestellt. Zu

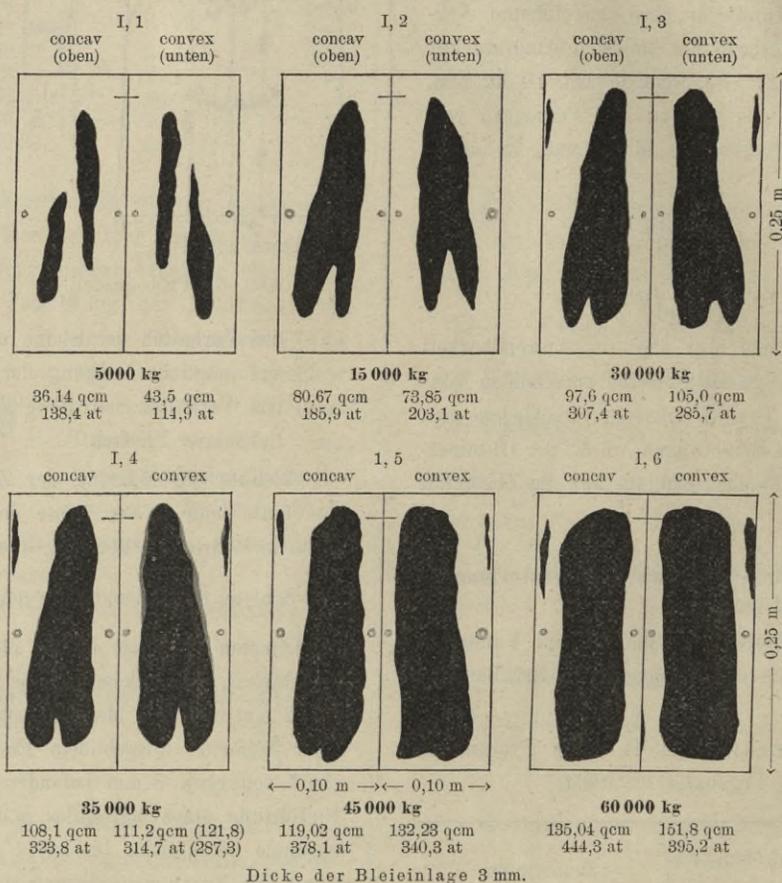


Abb. 7.

diesem Behufe steckte man auf die übereinanderliegenden Zapfen *c* und *e* am oberen und unteren Steine feste Planspiegel, welche der Bewegung des Gelenkes folgten, und deren Drehung mittels Ablesefernrohres an einer Millimetertheilung abgelesen wurde,

die in einer Entfernung von 2 m vor den Spiegeln aufgestellt war. Es wurde also an einem Theilbogen von 4 m Halbmesser abgelesen. Für

Belastungen von  
 2 4 6 8  
 10 15 20 25  
 30 35 40  
 60 80 t

ergab sich eine relative Bewegung von  
 +1,5 ± 0 -1,1 -1,3  
 -2,1 -2,9 -3,6 -4,6  
 -6,1 -7,1 -8,3  
 -11,6 -13,7 mm, an der Millimetertheilung gemessen, wobei mit dem Vorzeichen — eine Verkleinerung des dem Beobachter zugewandten Winkels, mit dem Zeichen + eine Vergrößerung dieses Winkels ausgedrückt ist.

Die Gesamtbewegung des Gelenkes ergibt sich aus obigem Versuche zu 1,5 + 13,7 = 15,2 mm oder in Winkelmafs umgerechnet zu 0° 13,1'. Diese 15,2 mm entsprechen durchaus

zeigten sich nach Beendigung der Versuche vollständig unbeschädigt und unverändert. Wie später gezeigt werden soll, kam ein völliges Anliegen der Bleiplatten, auch bei diesem hohen Drucke, nicht zustande, sodafs die wirkliche spezifische Pressung noch eine höhere war.

Professor Föppl-München bemerkt noch zu diesen Versuchen, dafs „nach der Spiegelmethode bei der Steigerung der Belastung ganz stetige Bewegungen im Gelenke zu constatiren waren.“

Ein Aufquellen des Steines unmittelbar am Gelenke findet nicht statt; vielmehr wird der Stein an diesem Punkte auch der Quere nach zusammengedrückt. Ueber den Grund dieser Erscheinung vermag man sich theoretisch Rechenschaft zu geben. Praktisch wichtig wird diese Beobachtung, da somit eine Zerstörung im Gelenke um so weniger zu befürchten ist.

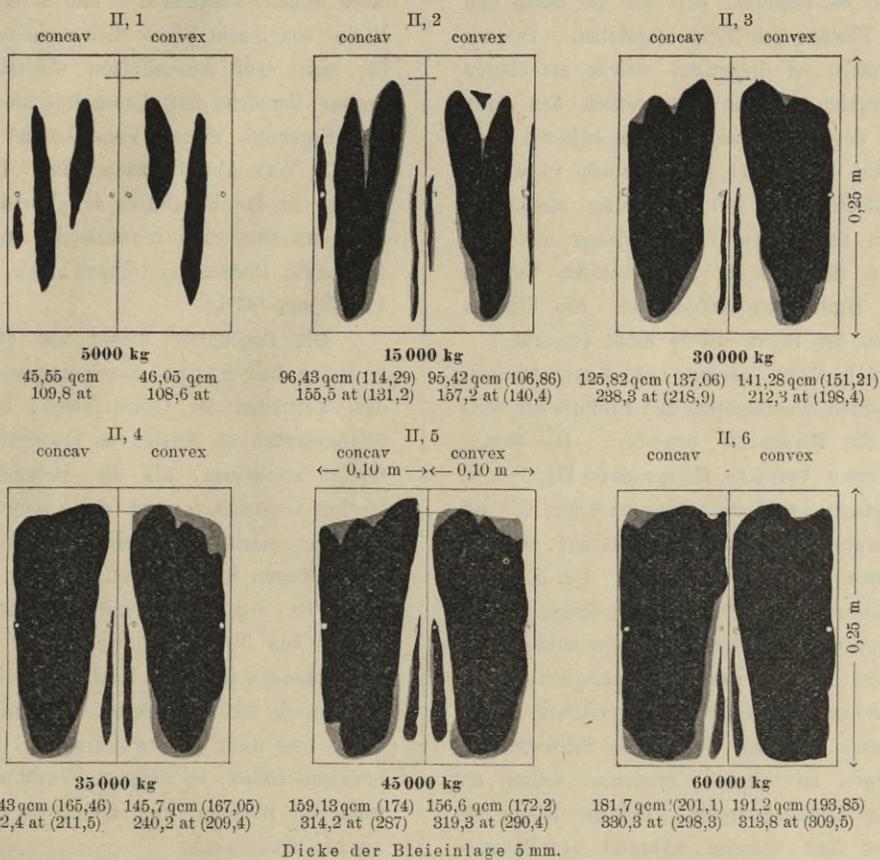


Abb. 8.

Die Versuche dehnten sich schliesslich noch auf das Verhalten des Bleies in der Fuge aus. Das Blei war gewöhnliches Walzweichblei von 250 qcm Fläche und von 3 mm durch-

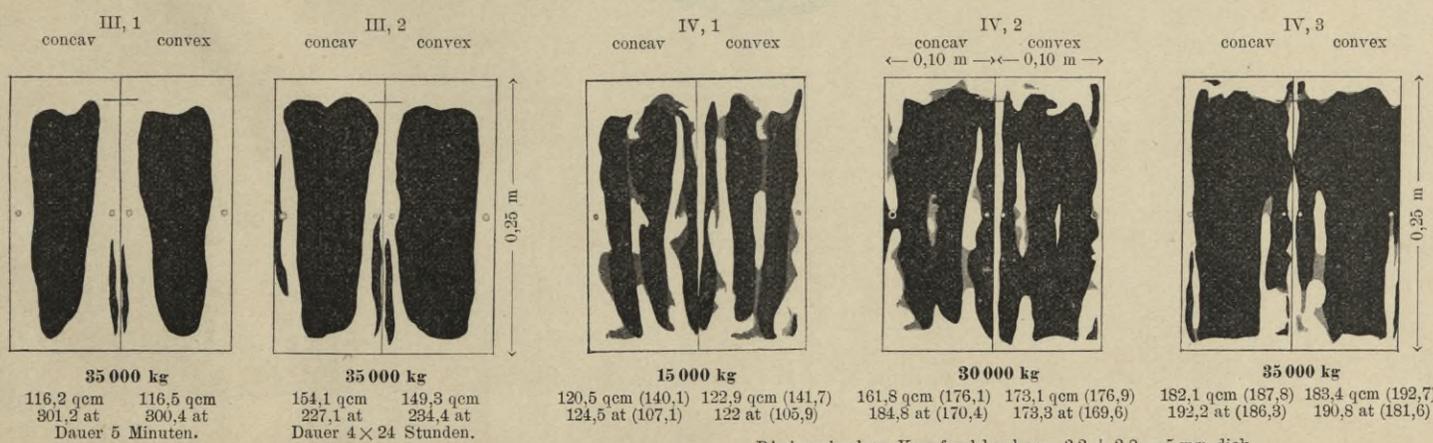


Abb. 9.

Blei zwischen Kupferblechen, 2,2 + 2,8 = 5 mm dick.

Abb. 10.

nicht etwa der wirklichen Annäherung der Punkte *c* und *e*, sondern geben nur das Mafs für den grössten Drehungswinkel ab.

Die Quader, die im Verlauf der Versuche einer grössten Belastung von 94 t ausgesetzt worden waren, woraus sich der mittlere Druck auf die Gelenkfläche zu  $\frac{94000}{25 \cdot 10} = 376$  kg (vollständiges Anliegen der Bleieinlage vorausgesetzt) berechnet,

aus gleichmäfsiger Stärke. Ueber die Druckfestigkeit dieses Materials liegen keine Versuche vor. Auf ein genaues Ausmassen der Fugen wurde bei diesen Versuchen nicht eingegangen. Das Aussehen der in den Text-Abbild. 7 bis 10 wiedergegebenen Diagramme der Bleieinlage ergibt, dafs die Fugen selbst unter dem grössten Drucke sich nicht völlig geschlossen hatten.

Es wurden folgende Versuche angestellt:

- |                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| I. Reihe mit 3 mm starkem Blei | } zwischen Messingblechen. |
| II. „ „ 5 mm „ „               |                            |
- Die Belastungszeit für diese Versuche betrug fünf Minuten.

Zu den Diagrammen sei bemerkt, daß sie die durch den Druck glatt gewordenen Flächen des Bleies darstellen. Die mit „conca“ bezeichnete Fläche ist diejenige, welche am oberen Steine anliegt. Die dunklen Flächen entsprechen den ganz klar umrissenen Flächen des Bleies, während die helleren Töne die Theile bezeichnen, auf denen der Druck schon zu wirken begonnen hat, ohne jedoch seine volle Wirkung auszuüben. Die Anlagestellen wurden nach jedem Einzelversuche umfahren und abgenommen, sodann das Blei für den nächsten Versuch wieder mit einer feinen Drahtbürste aufgeraut. Ein Fließen oder stärkeres Ausweichen des Bleies wurde nicht bemerkt.

Die Versuche der III. Reihe wurden mit 4 mm starkem Blei vorgenommen; sie sollten hauptsächlich den Einfluß der Zeitdauer des Druckes auf die Bleieinlage erproben. Die beiden unter 35 t Druck gemachten Versuche (Diagramme III, 1 u. 2, Text-Abb. 9) zeigen deutlich den Unterschied zwischen der bei III, 1 während fünf Minuten unterhaltenen Belastung und der bei III, 2  $4 \times 24$  Stunden dauernden Belastung. Die Zunahme ist derartig, daß anzunehmen ist, daß bei noch längerer Zeitdauer der Gesamtquerschnitt zur Wirkung kommen wird.

Für die Gelenke der Brücke waren ursprünglich 3 mm starke Bleieinlagen zwischen Kupferblechen vorgesehen. Nach den Ergebnissen der ersten Versuche, welche die Schwierigkeit, solches Blei zum Anliegen zu bringen, erwiesen, sollten an deren Stelle 5 mm starke Einlagen treten. Bei der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit konnten während der Bauaus-

führung weder 3 mm noch 5 mm starke Bleiplatten beigebracht werden. Deshalb wurden an Stelle einer Platte zwei Bleiplatten aus zur Verfügung stehendem Blei von 2,2 und 2,8 mm Stärke zwischen Kupferblechen verwandt. Um zu erheben, ob diese beiden, zusammen 5 mm starken Platten wie eine einzige Platte von 5 mm Stärke sich verhalten, oder ob etwa jede Platte für sich dem Anschließen widerstehen würde, wurden noch weitere Versuche mit diesen zusammengesetzten Platten gemacht. Das Ergebniss dieser Versuche ist aus den Diagrammen IV, 1 bis 3, Text-Abb. 10 zu ersehen. Bei der Rauheit des Kupferbleches ist das Ergebniss der Versuche ein weniger deutliches, aber immerhin zufriedenstellendes und zeigt, daß in der That diese zwei Platten zusammen sich verhalten wie eine Platte von 5 mm Stärke.

Die Ergebnisse dieser von den Professoren Baudirector v. Bach und Föppl vorgenommenen Versuche im Verein mit dem Verhalten der Granitgelenke lassen die Verwendung von Steingelenken an Stelle von Eisengelenken um so mehr gerechtfertigt erscheinen, als die Steingelenke thatsächlich weniger Kosten verursachen und das Auge mehr befriedigen. Sie er-muthigen somit zu weiterem Vorgehen in ähnlichem Sinne auch bei größeren Spannweiten.

Für eine vom Landesbaurath Leibbrand entworfene Brücke von 50 m Spannweite über den Neckar bei der Station Neckarhausen der Bahn Horb-Rottweil, welche neben der Strafse auch noch eine Kleinbahn von 1,0 m Spannweite aufnehmen wird, sind noch weitere Versuche in Aussicht genommen, die erweisen sollen, in welchem Verhältniss die Gelenkquader einerseits auf Biegung und andererseits auf rückwirkende Festigkeit zu berechnen sind.













POLITECHNIKA KRAKOWSKA  
BIBLIOTEKA GŁÓWNA

IV 34533  
L. inw.

Kdn. 524. 13. IX. 54

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000301249