

V 17/1/1 und

79

VERSUCHSANSTALT FÜR HOLZ, STEIN UND EISEN

PRÜFRAUM GABER • TECHNISCHE HOCHSCHULE KARLSRUHE

HEFT 1

VERSUCHE

MIT HOCHWERTIGEM

MAUERWERK

VON

E. GABER

Alle Rechte vorbehalten — Printed in Germany
Nachdruck mit Quellenangabe gestattet

Karlsruhe 1934

DRUCK: SÜDWESTDEUTSCHE DRUCK- UND VERLAGSGESELLSCHAFT M. B. H., KARLSRUHE AM RHEIN

Versuche über Elastizität und Festigkeit beim Mauerwerk und Beton aus hochwertigem Zement.

Vorwort.

Man hat bei uns in den letzten Jahrzehnten mit der Verdrängung des Menschen durch die Maschine, mit der Rationalisierung, mit der ganzen industriellen Entwicklung übers Ziel geschossen, und heute tragen wir schwer unter den Folgen der mangelnden Erkenntnis, daß man den Bau von Maschinen nach Belieben vornehmen oder unterlassen kann, daß aber die Menschen lebendige Werte sind, die einen eigenen Willen und ein Recht aufs Dasein haben. Dieses Überspannen einer an und für sich vernünftigen Entwicklung zeigt sich noch auf vielen andern Gebieten. In blindem Eifer hat man sich z. B. durch das gute und bequeme Bindemittel Zement dazu verleiten lassen, wahllos für Ingenieurbauwerke Beton und immer wieder Beton oder Eisenbeton zu verwenden, auch wenn dicht bei der Baustelle Naturstein gefunden wird. Erst Stampf-Beton, dann Guß-Beton, mit oder ohne Eiseneinlagen, sodaß man zunächst den naturgegebenen Baustoff Stein ganz und dann die naturgegebene Arbeitskraft Mensch in großem Maße entbehrlich machte. Diese überspitzte Entwicklung brachte es mit sich, daß unser junger Ingenieurnachwuchs fast nur noch in Beton und Eisenbeton, manche noch in Stahl und nur wenige in Holz konstruieren und bauen können. Die Kenntnisse der Eigenschaften unserer guten Baustoffe Holz und Stein sind verblaßt. Die Forschung hat sich ihrer nicht mehr in dem Maße angenommen wie beim Stahl und Zement, deren Fortentwicklung daher auch unaufhaltsam vorwärtsschritt. Dabei liefert die Natur in ihren mächtigen Sandstein- und Kalksteinbänken, in ihren Granit- und Gneisrippen ein ganz ausgezeichnetes Material für kleine und größte Bauwerke. Dieser natürliche Baustoff ist dem künstlichen Beton an Festigkeit, oft aber auch an Wetterbeständigkeit, Wasserdichtigkeit und dergleichen weit überlegen. / Bei dem heutigen Überfluß an Arbeitskräften wird man vielleicht doch wieder geneigt sein, gelegentlich zu natürlichen Bauweisen zurückzukehren und mehr als bisher die natürlichen Baustoffe Holz und Stein dort zu verwenden, wo sie wirtschaftlich sind. In die Vergleichsrechnung für die Wirtschaftlichkeit müssen aber alle Kosten eingesetzt werden; die Rechnung muß übers Ganze gehen und beachten, daß auch arbeitslose Brucharbeiter, Steinhauer und Maurer Kosten verursachen. In diesem Sinne will die Arbeit in allen Baukreisen, vor allem aber beim Nachwuchs wirken und zur Besinnung mahnen.

Bei Anlage u. Durchführung der umfangreichen u. kostspieligen Versuche hat sich mein langjähriger Mitarbeiter in der Versuchsanstalt, Dr.-Ing. Hoeffgen, verdient gemacht.

Karlsruhe, im November 1934

E. GABER

1. Zweck der Versuche.

Wenn auch die hervorragenden Eigenschaften unserer Bausteine schon lange bekannt sind, so erhebt sich doch die Frage, wieviel dem natürlichen Baustein von seinem Vorsprung gegenüber dem Beton bei seiner Verarbeitung zu Mauerwerk verloren geht, da dieses Mauerwerk zu einem nicht unerheblichen Teil aus Mörtel besteht. Um einen für den jungen und älteren Ingenieur wertvollen Überblick zu schaffen, wurden nun in der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen an der Technischen Hochschule Karlsruhe (Prüfraum Gaber) seit 1927 Versuche zu dem Zweck durchgeführt, einen für die Anwendung brauchbaren Vergleich zwischen Mauerwerk und Beton zu gewinnen. Mauerwerk und Beton wurden in möglichster Vollendung hergestellt durch Verwendung von hochwertigem Zement als Bindemittel, durch bestmögliche Mischung des Sandes und Zuschlages und vorteilhafteste Wasserzugabe. Die Erkenntnisse aus dem Bereich des Betons wurden nutzbar gemacht für Mauerwerk. Es wurden die für den Bauingenieur wichtigen natürlichen Gesteine Granit, Sandstein und Kalkstein untersucht, der hochwertige Zementmörtel für sich geprüft und schließlich das fertige Mauerwerk und der fertige Beton miteinander verglichen und dadurch ein Überblick über die elastischen und Festigkeitseigenschaften von Quadermauerwerk aus natürlichem Gestein einerseits und hochwertigem Guß- und Stampfbeton andererseits gewonnen.

Als Mauerwerk wurde hochwertiges Quadermauerwerk mit verschieden weiten (2—3 cm) Fugen und verschiedenen bearbeiteten Fugenflächen — glatt oder auch gespitzt — gewählt und die Steine aus dem Vollen mit einer Gattersäge herausgeschnitten.

Als Beton wurde hochwertiger Stampf- und Gußbeton mit Zuschlag aus Rheinkies oder Porphyrsplitt gewählt.

Bindemittel war immer hochwertiger Zement, dem anerkannt vorzüglicher Mainsand zugegeben wurde.

Um Zahlen zu erhalten, mit denen man bei einem hochwertigen Bauwerk auch rechnen kann, wurden die Versuchskörper nicht als Würfel, sondern als schlanke Prismen in solcher Größe hergestellt, als es die langspindelige 500 t-Maschine meiner Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen an der Technischen Hochschule Karlsruhe zuließ. Die Prismenfestigkeit ist bekanntlich erheblich kleiner als die Würffelfestigkeit.

Versuche an kleinen vollkommen fehlerfreien Versuchskörpern haben eigentlich nur vergleichenden Wert. Mit zunehmenden Abmessungen nimmt im allgemeinen die Festigkeit der Körper ab. Auch Mängel und Fehler lassen sich bei der Ausführung nicht vermeiden, besonders dann nicht, wenn, wie beim Massivbau, die Arbeit auf der Baustelle ungeschützt vor den Unbillen der Witterung vor sich geht. Die wirklichen Verhältnisse im Bauwerk sind daher bei der Anlage der Versuche weitgehend nachgeahmt worden. Dies wurde auch in den Abmessungen versucht, soweit es die vorhandenen Prüfeinrichtungen zuließen. Wie vorsichtig Festigkeitszahlen aus der Materialprüfung auf die Wirklichkeit angewendet werden müssen, ergibt sich schon aus dem Hinweis auf den großen Unterschied zwischen der Festigkeit eines Mörtelwürfels von 7,1 cm Kantenlänge und einer Fugenmörtelplatte von 2—3 cm Dicke im Mauerwerk.

Der konstruierende und bauende Ingenieur will die wahren Festigkeitszahlen erhalten, auf denen sich die Tragkraft seines Bauwerkes aufbaut und dadurch einen Begriff von der im Bauwerk wirklich vorhandenen Sicherheit gewinnen.

2. Der Mauerwerksmörtel.

A. Der hochwertige Zement.

Der Zement stammte aus Nürtingen.

Für die Prüfung des Normenmörtels ergab der Böhme'sche Hammerapparat einen notwendigen Wasserzusatz von 9 %. Nach eintägiger Lagerung an feuchter Luft und 27 Tagen unter Wasser betrug die

Normendruckfestigkeit	542 kg/cm ²
Normenzugfestigkeit	36/kg cm ² .

B. Der Mainsand.

Es wurden zwei Sorten angeliefert und untersucht, welche Fein- und Grobsand — F und G — genannt wurden. Beide Sande bestanden aus Feldspat, Quarz, Glimmer und ein wenig Kalkspat. Auch die feinsten Sandkörnchen zeigten unter dem Mikroskop abgerundete, gewölbte Oberflächen, welche sich mit wachsender Korngröße immer mehr der Kugelform näherten.

	Feinsand F	Grobsand G
Raumgewicht im geschütteten, natürl. Lagerzustande	1,61	1,59 t/m ³
eingerüttelt	1,77	1,78 t/m ³
Spezifisches Gewicht	2,49	2,50 kg/l

An 5 Proben wurde die Korngröße durch Sieben ermittelt. Im Mittel ergab sich das in Abb. 1 und 2 dargestellte Bild.

Aus diesen beiden angelieferten Sanden wurden vier Sandsorten durch Mischen hergestellt, deren Aufbau Abb. 3 zeigt.

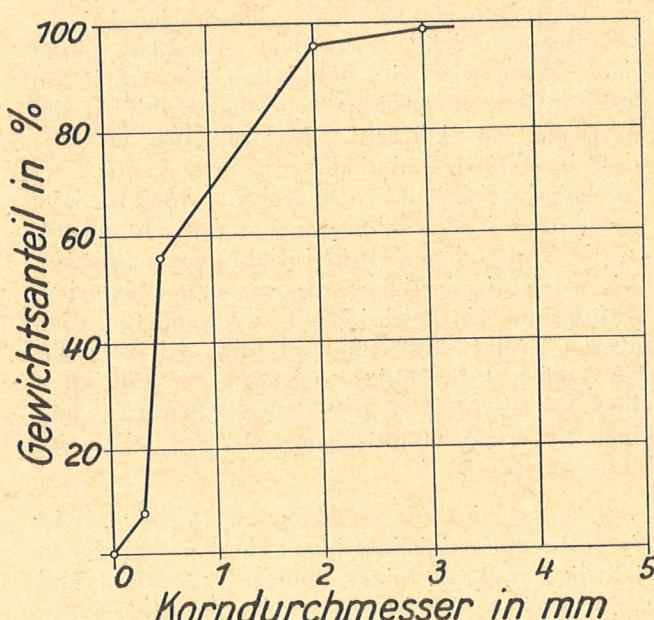


Abb. 1. Kornzusammensetzung des angelieferten Feinsandes.

Mit Hilfe des Volumenometers und aus einer Kontrolle unmittelbar mit einem Litergefäß wurden für die vier Sandsorten weiter Raumgewicht, Dichtigkeitsgrad und Hohlräume gefunden.

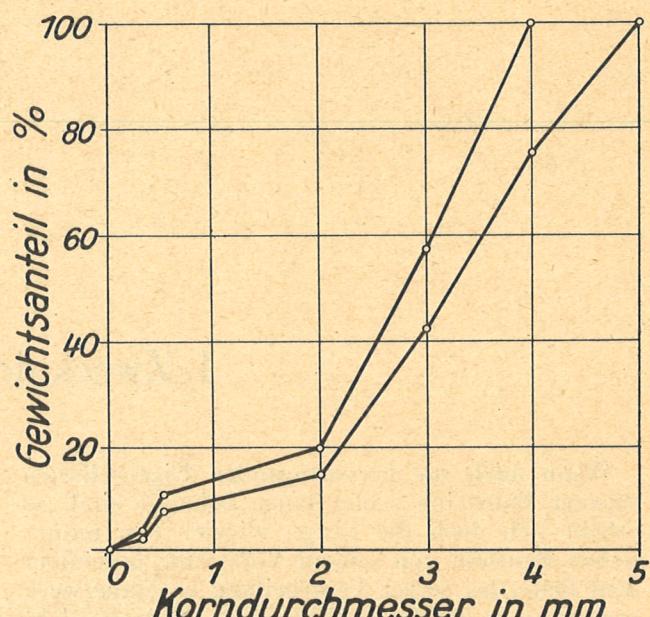


Abb. 2. Kornzusammensetzung des angelieferten Grobsandes.

Sand	Raumgewicht		Dichtigkeitsgrad	Raumprozent Hohlräume
	eingefüllt	eingerüttelt		
F ₁	1,63	1,84	0,71	29%
F ₂	1,60	1,79	0,69	31%
G ₁	1,70	1,91	0,74	26%
G ₂	1,66	1,83	0,71	29%

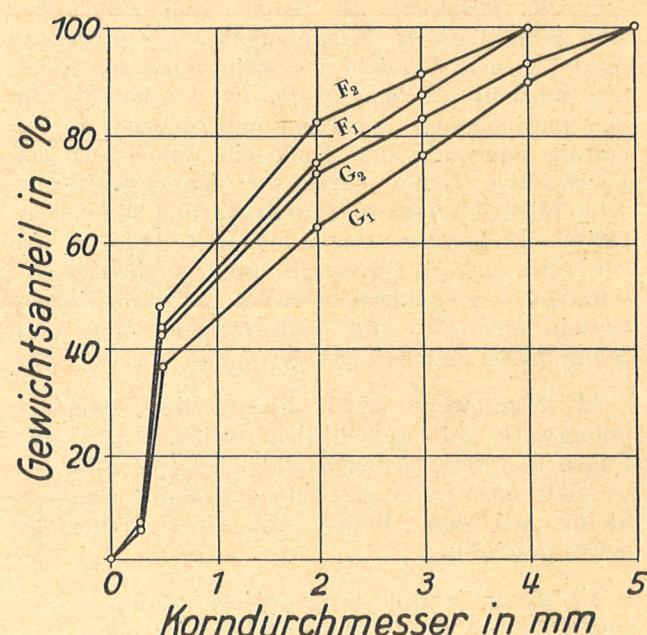


Abb. 3. Kornzusammensetzung der verwendeten Sandsorten.

Die grobe Sandsorte G_1 hatte das größte Raumgewicht 1,91 und den kleinsten Prozentsatz Hohlräume von nur 26 %. Es war daher zu erwarten, daß dieser Sand den besten Mörtel ergeben würde.

C. Der erdfeuchte Mörtel aus den vier Sandsorten.

Mit diesen vier Sandsorten und dem Nürtinger hochwertigen Zement wurden jeweils drei Mörtelmischungen im Raumverhältnis 1:2, 1:3, 1:4 hergestellt.

Der Mörtel wurde, um große Festigkeiten zu erzielen, erdfeucht angemacht; es wurde ihm also so viel Wasser zugesetzt, daß im Hammerapparat von Böhme sich der wässrige Zementbrei zwischen dem 90. und 110. Hammerschlag zeigte.

Der hierfür benötigte, in Gewichtsprozent ausgedrückte Wasserzusatz bei den verschiedenen Mörteln betrug

Sandsorte	M ö r t e l			
	1 : 2	1 : 3	1 : 4	R.T.
F_1 und F_2	9,5	8,5	8,0	%
G_1 und G_2	9,5	8,3	7,8	%

Die Versuchskörper für Zug und Druck lagerten einen Tag lang in feuchter Luft und die übrige Zeit in Wasser. Sechs gleichartige Körper wurden im Alter von 7 Tagen und weitere sechs Körper im Alter von 28 Tagen geprüft. Die gemittelten Festigkeiten stehen in folgender Liste:

Sand	7 Tage alt						28 Tage alt						R. T.	
	1 : 2		1 : 3		1 : 4		1 : 2		1 : 3		1 : 4			
	Zug	Druck	Zug	Druck	Zug	Druck	Zug	Druck	Zug	Druck	Zug	Druck		
F_1	38	533	32	505	32	415	44	629	—	—	—	—	kg/cm ²	
F_2	44	566	30	440	29	407	45	661	—	—	—	—	kg/cm ²	
G_1	43	571	32	508	28	430	44	634	47	646	40	604	kg/cm ²	
G_2	45	604	31	489	26	426	48	670	42	619	38	593	kg/cm ²	

Bei den üblichen Mörtelmischungen 1:3 und 1:4 brachte, wie erwartet, die Sandsorte G_1 , welche von allen vier Sorten die grösste war, die grössten Zug- und Druckfestigkeiten, welche betragen

keit von 47 kg/cm² Zug und 646 kg/cm² Druck eine hohe und nur bei einer so sorgfältigen Zubereitung und Behandlung des Mörtels erreichbar, wie sie auf der Baustelle nicht möglich ist.

Für die Anwendung scheidet der überfette Mörtel 1:2 aus, da der Mehraufwand an Zement nur einem verhältnismäßig geringen Zuwachs an Festigkeit entspricht. Für die üblichen Mörtelmischungen 1:3 und 1:4 ergab der grobe Sand G_1 , welcher von allen vier Sandsorten das grösste Raumgewicht, den grössten Dichtigkeitsgrad, also den kleinsten Prozentsatz an Hohlräumen aufwies, auch die höchsten Festigkeiten.

Für stark beanspruchte Mauerwerkskörper empfiehlt sich hiernach die Verwendung eines erdfeuchten Mörtels 1:3 aus hochwertigem Zement, zu dem ein grober Sand mit Korngrößen bis zu 5 mm verwandt wird und in einer solchen Mischung, daß sein Raumgewicht den grösstmöglichen Wert annimmt. Man kann dann Würfeldruckfestigkeiten erreichen, welche an die der guten Bausteine nahezu heranreichen.

	Zug	Druck
1 : 4	1 : 3	1 : 4
nach 7 Tagen . .	28 32 kg/cm ²	430 508 kg/cm ²
nach 28 Tagen . .	40 47 kg/cm ²	604 646 kg/cm ²

Nur bei dem überfetten Mörtel 1:2 ergab die etwas feinere Sandsorte G_2 noch grössere Festigkeiten, nämlich

Bei dem erdfeuchten Mörtel der üblichen Mischung 1:3 ist die nach 28 Tagen erzielte Festig-

Zu den Mauerwerkskörpern wurden Granit aus dem badischen Schwarzwald, Sandstein aus dem unteren Neckartal und Muschelkalk aus dem hinteren Odenwald verwendet. Die mehr oder minder roh angelieferten Felsblöcke wurden in der Versuchsanstalt auf der Gesteinsgattersäge (Abb. 4) zu quadratischen Quadern von 20 oder 30 cm Seitenlänge zerschnitten. Daneben wurden zur Ermittlung der Gesteinsfestigkeit Würfel (Abb. 5)

von 20 bis 25 cm Kantenlänge hergestellt, deren Druckflächen in einer Würfelschleifmaschine (Abb. 6) zwangsläufig eben und parallel gemacht wurden.

Es wurden verschiedene Reihen von je 3 bis 6 gleichen Würfeln mit verschiedenen großen Kantenlängen zerdrückt (Abb. 7), um auch den Einfluß der Würfelgröße auf die Festigkeit zu zeigen.

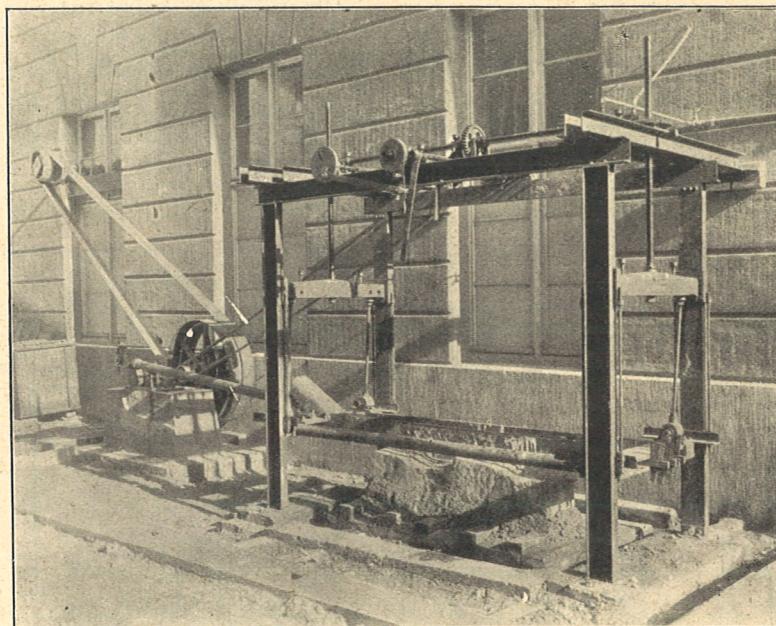


Abb. 4. Die elektrisch betriebene Steingattersäge zersägt Felsblöcke von einer Größenabmessung 0,65/0,65/1,60 m.

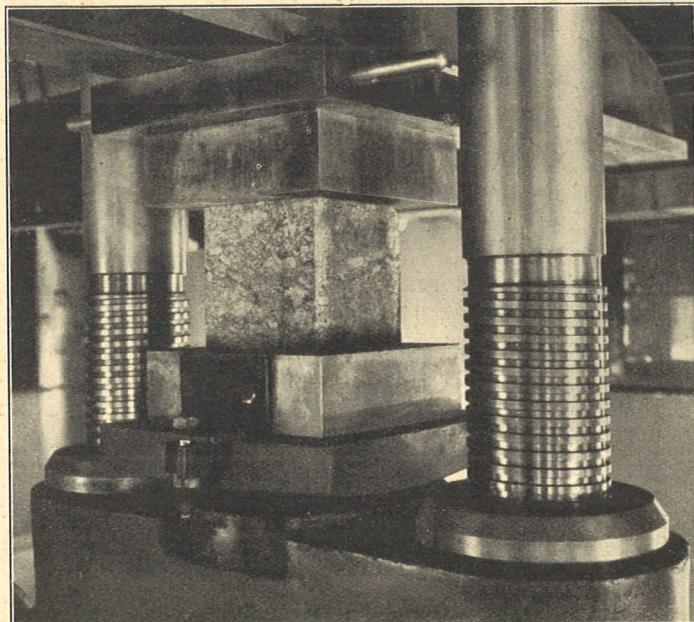


Abb. 5. Die 500-t-Presse mit einem eingebauten Granitwürfel von 20 cm Kantenlänge.

Würfel-Kantenlänge in cm	Mittlere Druckfestigkeiten in kg/cm ²		
	Granit	Sandstein	Kalkstein
3,5	1390	—	—
7	1150	787	783
10	980	581	—
12	1230	—	—
15	—	—	(643) 687
18	—	915	—
20	<u>1280</u>	<u>875</u>	<u>655</u>
25	857	—	628

*) Gaber, „Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit bei Naturgestein v. der Kantenlänge der Steinwürfel“, Steinbruch u. Sandgrube, Nr. 16 v. 5. 6. 29

Die Einzelzahlen stellen die Mittelwerte aus drei bis sechs Versuchen dar. Die mittleren Abweichungen der Versuchswerte von den hier niedergeschriebenen Mittelwerten nehmen von 22 bis auf 4 % ab, wenn die Kantenlänge der Würfel von 3,5 auf 20 cm steigt. Große Würfel ergeben also ein zutreffenderes Bild als kleine, außerdem aber kleinere Festigkeiten, welche freilich den wahren Verhältnissen mehr entsprechen.

In der nachstehenden Tabelle ist das lufttrockene Raumgewicht der Würfeldruckfestigkeit bei 20 cm Kantenlänge gegenübergestellt.

	Granit	Sandstein	Kalkstein
Raumgewicht in t/m ³ . .	2,6	2,23	2,44
Druckfestigkeit in kg/cm ²	1280	875	655

Auch beim Stein bringt wie beim Mörtel das höchste Raumgewicht die höchste Festigkeit. Nur der schwere, aber glasige Kalkstein ist weniger fest als der leichtere, aber zähe Sandstein. Ein gutes Bild gibt die Traglänge nach Engesser, Festigkeit durch Raumgewicht: Granit 4930, Sandstein 3930, Kalkstein 2680 m. Granit überragt alles.

Abb. 6. Die elektrisch betriebene Würfelschleifmaschine erzeugt zwangsläufig parallele Seitenflächen durch Bearbeiten mit Carborundumscheiben.

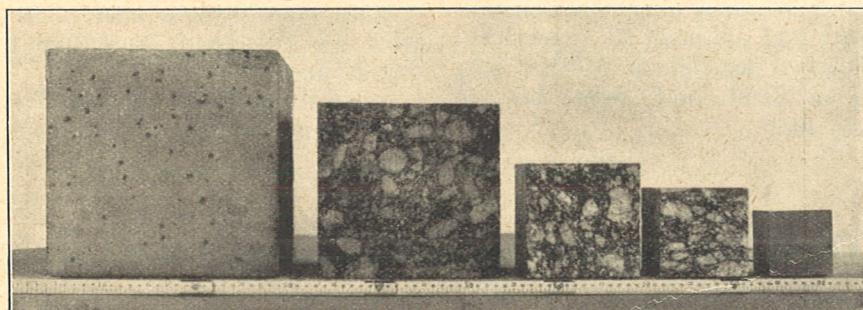
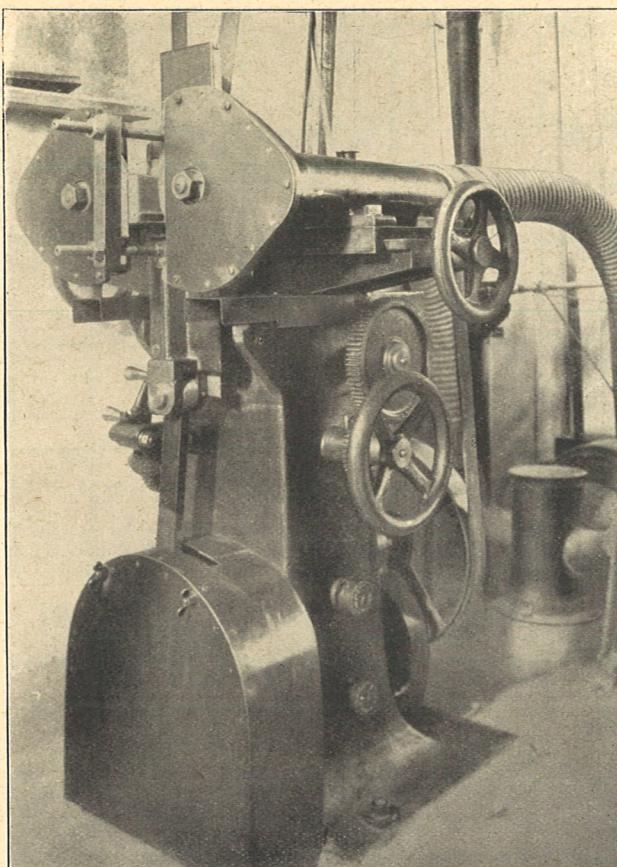


Abb. 7. Würfel versch. Größe, v. links nach rechts: Sandsteinwürfel 30 cm, Granitwürfel 20, 13 u. 10 cm, Basaltwürfel 7 cm Kantenlänge.

4. Der Beton.

Es wurden Betonprismen in der Mischung 1:5 und 1:6 Raümteile sowohl aus Stampfbeton wie aus Gußbeton in hölzerner Schalung liegend hergestellt. Der quadratische Querschnitt hatte 30 cm Seitenlänge. Die Prismenhöhe betrug 50 cm. Zuschlag war entweder Rheinkies, der aus einer Kiesgrube bei Karlsruhe stammte, oder Porphyrsplitt, der von einem Schotterwerk an der Bergstraße im Odenwald geliefert wurde.

Der Rheinkies wurde in Sand bis 7 mm Korngröße und Kies mit Korngrößen von 7 bis 40 mm zerlegt.

Der Mörtel zu den acht verschiedenen Betonsorten wurde nach dem Graf'schen Vorschlage trocken so zusammengemischt, daß von dem aus Zement und Sand nun bestehenden Trockenmischung fielen

25 % durch das Sieb mit 900 Maschen

35 % durch das Sieb mit 1 mm Lochdurchmesser

65 % durch das Sieb mit 3 mm Lochdurchmesser

100 % durch das Sieb mit 7 mm Lochdurchmesser.

In Abb. 8 ist diese Verteilung dargestellt.

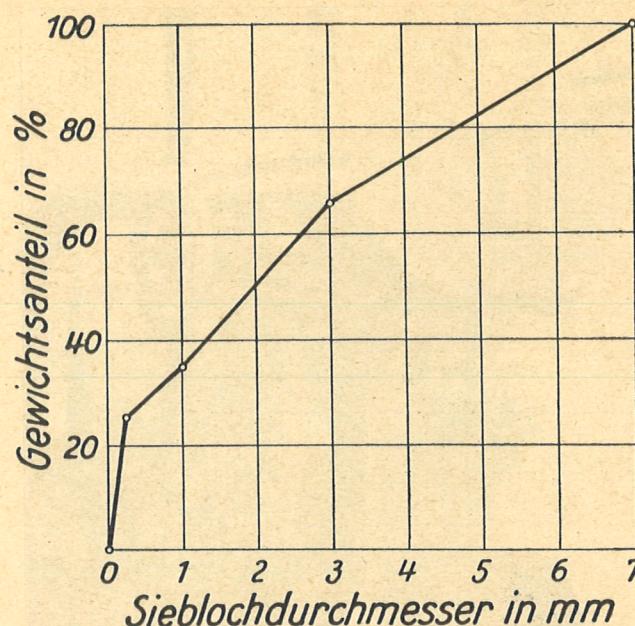


Abb. 8. Korngrößenauflistung des trocken gemischten Mörtels.

Der Porphyrsplitt hatte eine mittlere Steingröße von 35 mm und wurde durch Zumischen von jeweils 69 kg Rheinkies mit Korngrößen von 7 bis 12 mm zu 200 kg Splitt dichter gemacht. Der Mörtel dieses Porphyrsplittbetons entsprach den obigen Angaben beim Kiesbeton. In folgender Liste finden sich die Angaben über den Zementzusatz, Wasserzusatz und die nach 28 Tagen festgestellte Würfelfestigkeit des Betons, welcher acht Tage unter feuchtem Sand und dann in der Zimmerluft gelagert hat.

	Porphyrsplitt-Beton		Rheinkies-Beton	
	Stampf-Beton 1:5 1:6	Guß-Beton 1:5 1:6	Guß-Beton 1:5 1:6	Stampf-Beton 1:5 1:6
kg Zement in cbm frischem Beton . . .	291	245	291	235
Gewichtsprozent Wasser, bezogen auf den trockenen Beton	7,1	6,0	7,9	8,8
Würfelfestigkeit Wb 28	327	244	191	163
Raumgew. des Betons nach 28 Tagen in t/m³	2,36	2,33	2,31	2,26

Der Stampfbeton hat zwar kein wesentlich größeres Raumgewicht als der Gußbeton, aber doch eine ganz wesentlich höhere Festigkeit am Würfel, denn sie beträgt im Mischungsverh. 1:5 1:6 RT beim Splittbeton das 1,7 1,5fache des Gußbetons beim Kiesbeton das 1,25 1,1fache des Gußbetons

Lehrreich ist auch die Feststellung, inwieweit der Mehraufwand an Zement beim Beton 1:5 einen Zuwachs an Festigkeit bringt.

	Rheinkies		Splitt		%
	Stampfbeton	Gußbeton	Stampf-Beton	Gußbeton	
Mehrzement	18	26	19	24	
Mehrfestigk.	36	23	34	17	%

Beim Stampfbeton, aber nicht beim Gußbeton, wird die Festigkeit prozentual mehr erhöht, als der Zementanteil steigt.

Im übrigen bringt der mit Rheinkies gemischte Porphyrsplitt die höchsten Festigkeiten.

5. Die Versuche mit den Mauerwerks- und Betonprismen.

Die Mauerwerksprismen entstanden durch Aufeinandermauern von jeweils drei quadratischen Quadern 30/30/15 cm, — beim Granit auch 20/20/10 cm, — sodaß zwei Lagerfugen, aber keine Stoßfugen entstanden. Die Fugenweite betrug bei einigen Prismen 2, bei andern 3 cm. Die Lagerfugen blieben meist so glatt, wie sie aus der Steinsäge kamen; nur beim Granit und z. T. beim Sandstein wurden einige vor dem Vermauern mit dem Spitzzeisen aufgeraut. Der erdfeuchte Fugenmörtel wurde in der Mischung 1:3 und 1:4 nach den vorigen Angaben immer wieder für jede Reihe von 3 Prismen frisch angemacht. Von jeder neuen Mörtelmischung wurden Probewürfel angefertigt und nach 28 Tagen die Würfelfestigkeit ermittelt. Diese Mörtelfestigkeiten sind meistens kleiner als die bei der Voruntersuchung gefundenen Werte. Der Festigkeitsabfall erklärt sich vielleicht aus weniger sorgfältiger Mörtelzubereitung, vielleicht aber auch aus einer Einbuße des Zementes

an Festigkeit durch Lagern. Der erdfeuchte Mörtel wurde in die Fugen der liegend zwischen Holzschalung eingebauten angefeuchteten Mauerwerksprismen mit einem Flacheisen eingestampft. Die fertig gemauerten Körper wurden mit Tüchern überdeckt und durch häufiges Begießen mit Wasser so feucht gehalten, daß das zum Abbinden erforderliche Wasser im Mörtel immer vorhanden war. Genau so wurden die liegend betonierten Betonprismen 30/30/50 cm behandelt.

A. Die Bruchfestigkeiten der Mauerkörper.

Die Prüfung erfolgte in einer 500-t-Presse (Abb. 9).

Jedes Prisma war dreimal vorhanden, sodaß das Mittel aus drei Einzelversuchen, welche 28 bis 30 Tage nach der Mauerung durchgeführt wurden, gebildet werden konnte.

Druckfestigkeit der kleinen Granitprismen mit 20 cm Seitenlänge.

kg Zement	Mörtel	Lagerfuge	Steinwürfelfestigkeit kg/cm²	Mörtelfestigkeit kg/cm²	Mauerfestigkeit	
					kg/cm²	Mittel kg/cm²
0,219	1 : 3	3 cm, glatt	1280	448	614 3 Vers.	
0,219	1 : 3	2 cm, glatt	1280	448	648 nur 2 Vers.	610
0,204	1 : 3	2 cm, rauh	1280	443	530 nur 1 Vers.	
0,164	1 : 4	3 cm, rauh	1280	389	554 3 Vers.	
0,153	1 : 4	2 cm, rauh	1280	299	447 nur 2 Vers.	510
0,164	1 : 4	2 cm, rauh	1280	389	489 nur 1 Vers.	

Dieses Mauerwerk mit Mörtel 1:3 hat eine Prismenfestigkeit von

47 % der Würffelfestigkeit des Steines und
137 % der Würffelfestigkeit des Mörtels.

Dieses Mauerwerk mit Mörtel 1:4 hat eine Prismenfestigkeit von

40 % der Würffelfestigkeit des Steines und
139 % der Würffelfestigkeit des Mörtels.

Druckfestigkeit der großen Mauerkörper in kg/cm²

Mör-tel	Lagerfuge	Festigkeit des 20 cm Steinwürfels			Mörtel-festigkeit			Mauer-festigkeit		
		Granit	Sandstein	Kalkstein	Granit	Sandstein	Kalkstein	Granit	Sandstein	Kalkstein
1 : 3	3 cm rauh	1280			443			596		
1 : 3	2 cm rauh	1280	875		443	435		590	464	
1 : 4	3 cm rauh	1280			389			586		
1 : 4	2 cm rauh	1280			299			398		
1 : 3	3 cm glatt		875			500			339	
1 : 3	2 cm glatt		875	655		500	266		365	323
1 : 1	2 cm glatt			655			186			303

Die Normenprobe des zu dem Kalkstein verwendeten lange gelagerten Zementes ergab nur noch Festigkeiten von 354 gegenüber früheren 542 kg/cm². Daraus muß geschlossen werden, daß die geringe Mörtelfestigkeit beim Kalksteinmauerwerk wohl durch die Verwendung von inzwischen minderwertig gewordenem Zement verursacht wurde.

Im Mittel ergaben sich bei Verwendung von Mörtel 1:3 und 1:4 folgende Mauerwerksfestigkeiten:

	Granit	Sandstein	Kalkstein	
Mauerwerk 1:3 . . .	593	389	323	kg/cm²
Mörtelfestigkeit . . .	443	478	266	
Mauerwerk 1:4 . . .	492	—	303	kg/cm²
Mörtelfestigkeit . . .	344	—	186	

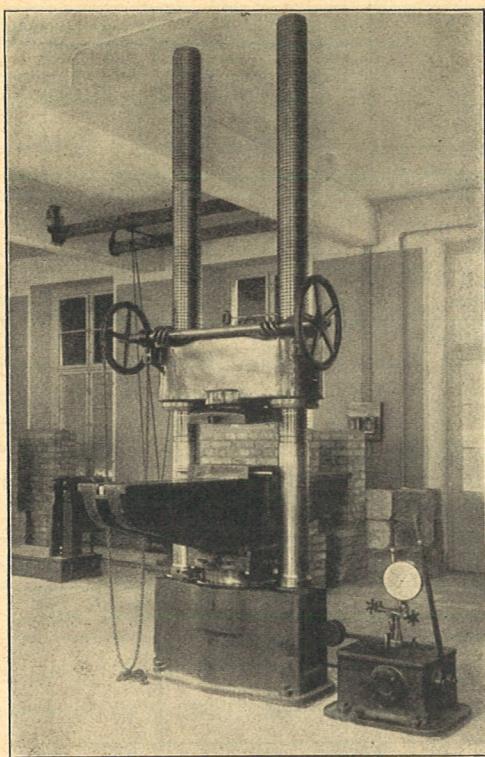


Abb. 9. Ansicht der 500-t-Presse, in welcher die Mauerwerkskörper geprüft wurden.

Im Mittel beträgt die Mauerwerksfestigkeit also, bezogen auf die Mörtelfestigkeit oder Gesteinsfestigkeit

	Granit	Sandstein	Kalkstein	
beim Mörtel 1:3	46	44	49	% der Gesteinsfestigkeit
beim Mörtel 1:4	38	—	46	% der Gesteinsfestigkeit
beim Mörtel 1:3	134	82	121	% der Mörtelfestigkeit
beim Mörtel 1:4	143	—	163	% der Mörtelfestigkeit

Beim üblichen Mörtel 1:3 hatte dieses Mauerwerk beinahe die Hälfte der Gesteinsfestigkeit und — mit Ausnahme des Sandsteines — $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ mehr als die Mörtelfestigkeit. Der poröse Sandstein hat offenbar dem Fugenmörtel Abbindewasser entzogen, hätte also mehr angefeuchtet werden müssen.

B. Die Druckfestigkeit der Betonprismen.

Die 28 Tage alten Stampf- und Gußbetonprismen ergaben bedeutend niedrigere Festigkeiten als das Mauerwerk; die nachstehenden Zahlen sind Mittel aus 3 Versuchen. Die Einzelprismen zeigten ein gut übereinstimmendes Ergebnis, denn die mittleren Abweichungen betragen höchstens 6 %.

	Rheinkies				Porphyrsplitt			
	Stampf-Beton		Guß-Beton		Guß-Beton		Stampf-Beton	
	Mittel	mittlere Abwehg. von Mittel	Mittel	mittlere Abwehg. von Mittel	Mittel	mittlere Abwehg. von Mittel	Mittel	mittlere Abwehg. von Mittel
Mischung 1 : 5	152	2%	119	1%	179	2%	272	4%
Mischung 1 : 6	97	4%	85	6%	136	4%	217	4%

Die größte Festigkeit in Höhe von 272 kg/cm² erreichte der Stampfbeton 1:5 mit Splitt und beigemengtem Rheinkies als Zuschlag.

Da mit jedem angefertigten Betonprisma auch Probewürfel von 30 cm Kantenlänge im gleichen Alter von 28 Tagen zerdrückt wurden, kann in nachfolgender Liste angegeben werden, wieviel Prozente der Würzelfestigkeit jedes Betonprisma erreicht hat.

Zuschlag:	Rheinkies			Porphyrsplitt		
	Stampf-Beton	Guß-Beton	Mittel	Stampf-Beton	Guß-Beton	Mittel
Mischung 1 : 5	74	73	73%	83	94	89%
Mischung 1 : 6	65	63	64%	89	83	86%
Mittel	70 68			86 89		
	69%			87%		

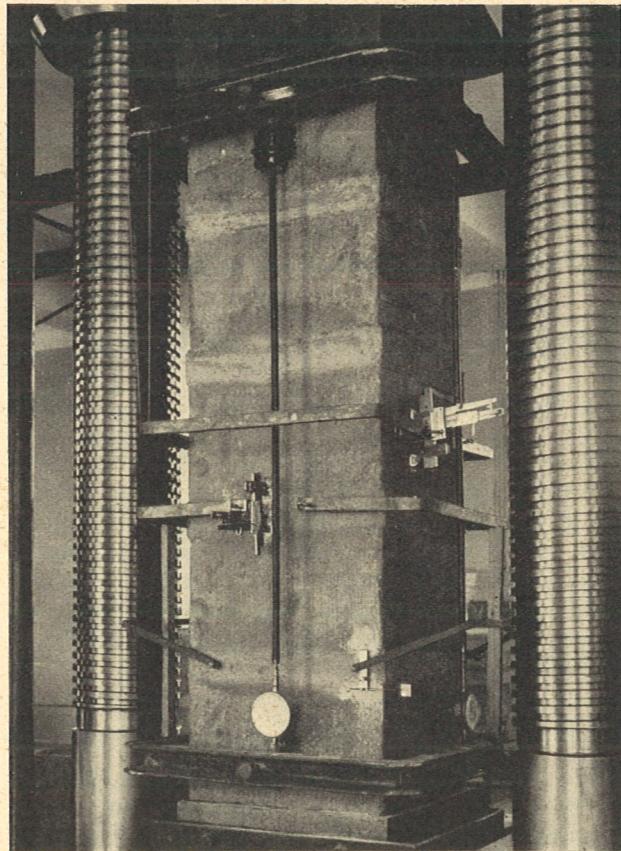


Abb. 10. Ein Mauerwerksprisma aus 5 Kalksteinquadern mit hochwertigem Zementmörtel in den 3 cm weiten Fugen in der 500-t-Presse, ausgerüstet mit den Feinmeßinstrumenten zur Feststellung der Längenänderung insgesamt, der Längenänderung innerhalb eines Quaders und der Längenänderung über eine Fuge.

Die Festigkeit des Gußbetons ist durchweg bedeutend niedriger als die des gleichartigen Stampfbetons. In der nachfolgenden Tabelle ist sie als Prozentsatz der Druckfestigkeit des gleichartigen Stampfbetons angegeben. Die zweite Zahl bedeutet das Prozentverhältnis, wie es sich aus den Würzelfestigkeiten Gußbeton : Stampfbeton ergab.

Zuschlag:	Rheinkies		Porphyrsplitt		
	Festigkeit von Gußbeton im Vergleich zu Stampfbeton ausgedrückt als Prozentsatz		beim Prisma	beim Würfel	beim Prisma
Mischung 1 : 5	78 %		80 %	66 %	58 %
Mischung 1 : 6	88 %		89 %	63 %	67 %

Sowohl im 30 cm großen Würfel als auch im Prisma hat der Gußbeton beim Rheinkies rund 85%, beim Porphyrsplitt rund 65% der Druckfestigkeit des Stampfbetons. Die Einbuße an Festigkeit durch Gießen des Betons ist daher beim Splittbeton mit 35% am größten.

C. Das elastische Verhalten der Steine und Mauerwerkskörper.

Bei den Würfeln aller drei Gesteinsarten wurden die gesamten, die bleibenden und die elastischen Dehnungen ε in Abhängigkeit von der Druckspannung σ mit Hilfe des Martens-Spiegelapparates gemessen und in den Abbildungen 5 bis 16 aufgezeichnet.

Auch bei den Mauerwerks- und Betonprismen wurden die Dehnungen mit Hilfe des gleichen Apparates (Abb. 10) festgestellt. Die Meßlänge war bei den kleinen Prismen von 20/20 cm Querschnitt 260 mm und bei den großen Prismen von 30/30 cm Querschnitt 350 mm, bezog also jedes Mal beide Mörtelfugen mit ein. Als Maschine diente eine 500-t-Presse (Abb. 11).

Aus den Spannungs-Dehnungslinien wurde der Elastizitätsmodul für die federnden Dehnungen beim Granit im Spannungsbereich Null bis 100, beim Kalkstein und Sandstein nur bis 75 kg/cm² und beim Beton nur bis 50 kg/cm² berechnet. Die Mittelwerte sind dem gleichartigen Elastizitätsmodul am Gesteinswürfel oder Betonwürfel in folgender Liste gegenüber gestellt.

Mörtel	Lagerfuge	E am Mauerwerksprisma			E am Gesteinswürfel		
		Granit E 100	Sandstein E 75	Kalkstein E 75	Granit E 100	Sandstein E 75	Kalkstein E 75*
1:3	3 cm rauh	371000	—	—	350000	148000	360000
	2 cm rauh	248000	79000	—			
1:4	3 cm rauh	238000	—	—	kg/cm ²		
	2 cm rauh	223000	—	—			
1:3	3 cm glatt	353000	84000	—			
	2 cm glatt	372000	75000	257000			
1:4	2 cm glatt	—	—	246000			

*) 15 cm Kantenlänge.

Betonprismen.

Elastizitätsmodul für den Spannungsbereich bis 50 kg/cm^2 .

Zuschlag:	Rheinkies		Porphyrsplitt	
	Stampf-Beton E 50	Guß-Beton E 50	Guß-Beton E 50	Stampf-Beton E 50
Mischung 1 : 5	212 000	185 000	246 000	289 000
Mischung 1 : 6	140 000	132 000	225 000	260 000

Die Betrachtung der Listen und der in Abb. 23 aufgezeichneten Spannungsdehnungslinien ergibt folgende Feststellungen:

Granit:

Während der Würfel noch seine Spannungsdehnungslinie nach Abb. 23a krümmt, hat das Mauerwerk meistens die entgegengesetzte Krümmung seiner σ/ε -Linie nach Abb. 23b.

Beim Mörtel 1:3 hat das Mauerwerk mit $E = 330 000 \text{ kg/cm}^2$ ungefähr den gleichen Wert wie der Steinwürfel mit $E = 350 000 \text{ kg/cm}^2$. Durch den weniger fetten Mörtel 1:4 sinkt aber der E-Wert erheblich unter den des Steins, denn er beträgt mit rund $230 000 \text{ kg/cm}^2$ nur noch 66 % von dem des Steinwertes.

Sandstein:

Beim Gesteinswürfel Abb. 23c hat die Spannungsdehnungslinie die gleiche Gestalt wie beim Granit.

Beim Mauerwerksprisma hat die σ/ε -Linie anfänglich die gleiche Krümmung, dann ändert sich aber die Gestalt (Abb. 23d), da bei höheren Spannungen die Dehnungen rascher wachsen. Gemittelt ist $E_{75} = 79 000 \text{ kg/cm}^2$ gegenüber 148 000 des Steins, sodaß das Mauerwerk trotz seines fetten Mörtels 1:3 um 87 % größere Dehnungen hat. Der Fugenmörtel konnte offenbar nicht richtig abbinden, da ihm zu viel Wasser vom porösen Sandstein entzogen wurde.

Kalkstein:

Mit einer einzigen Ausnahme zeigen alle geprüften Steinwürfel eine σ/ε -Linie, die von denen des Granits und Sandsteins grundsätzlich abweicht und in Abb. 23e gezeigt wird. Die Dehnungen wachsen nicht wie dort langsamer, sondern rascher als die Spannungen an.

Die σ/ε -Linie bei den Mauerwerksprismen hat ähnliche Gestalt, nur stärkere Krümmung (Abb. 23f). Beim Mauerwerk bewirkt die Verschlechterung des Mörtels von 1:3 auf 1:4 nur eine Verkleinerung des E_{75} um rund 4 %. Bei beiden Mauerwerksprismenarten sind die Dehnungen um 29 und 32 % größer als die des Gesteinswürfels.

Beton:

Ein Magerwerden der Mischung bewirkt beim Beton natürlich ein Sinken des E-Wertes und eine Zunahme der Dehnungen. Dies zeigt sich besonders stark beim Kiesbeton und weniger stark beim Splittbeton. Das Gießen bringt folgenden prozentualen Abfall der E-Werte und folgende Zunahme also der Dehnungen:

Mischung	Rheinkiesbeton	Splittbeton
1:5	23 %	15 %
1:6	6 %	13 %

D. Vergleich der verschiedenen Gesteinsarten.

Nachstehend werden die für die Festigkeit und den Elastizitätsmodul erhaltenen Werte in kg/cm^2 für die würzelförmigen und die Prismen-Versuchskörper als Mittelwerte gegenüber gestellt.

Würfel	Granit	Sandstein	Kalkstein	Splitt- stampfbeton 1 : 5	Splitt- stampfbeton 1 : 6
σ -B E Mittel	1280 350000	875 148000	655 360000	327	244
Spannungs- bereich	0—100	0—75	0—75	0—50	0—50

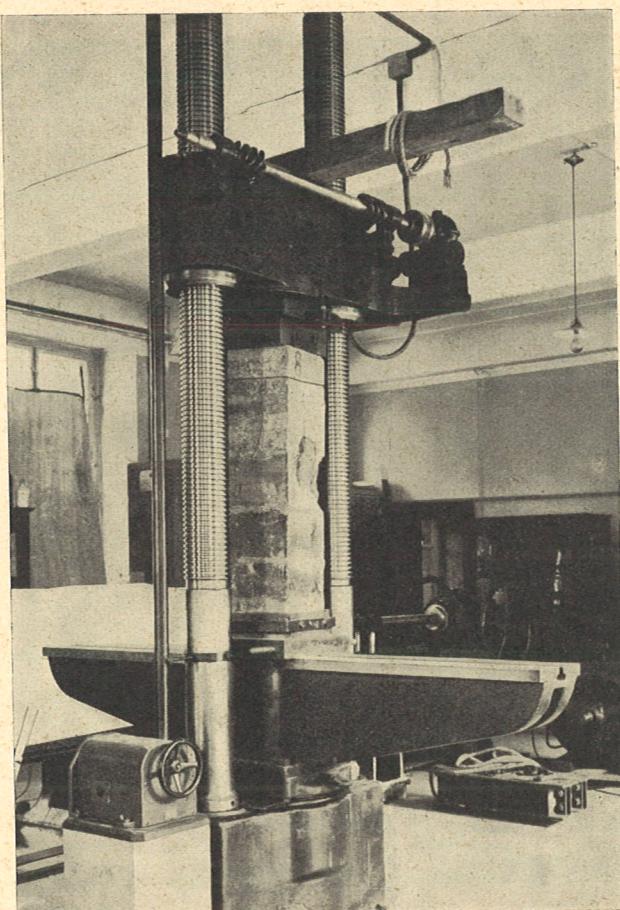


Abb. 11. Gesamtansicht der 500-t-Presse mit einem eingebauten Mauerwerksprisma aus Kalkstein mit 2 cm weiter Mörtelfuge nach der Zerstörung.

Prismen mit dem Mörtel 1 : 3	Granit	Sandstein	Kalkstein	Splitt- stampfbeton 1 : 5	Splitt- stampfbeton 1 : 6
σ_B	593 1	389 0,66	323 0,54	272 0,46	217 0,37
E Mittel	330000 1	79000 0,24	257000 0,78	289000 0,88	260000 0,79
$\frac{1}{E}$	1	4,18	1,28	1,14	1,27
Spannungsbereich	0—100	0—75	0—75	0—50	0—50

Man sieht hieraus, daß der Sandsteinwürfel und das Sandsteinmauerwerk einen auffallend kleinen E-Wert haben. Die Dehnungen des Granitmauerwerks mit Mörtel 1:3 gleich der Einheit gesetzt, gibt für Sandstein um 318%, für Kalkstein um 28%, für Stampfbeton 1:6 um 27% und für Stampfbeton 1:5 um 14% größere Dehnungen. Die Größe der Dehnungen richtet sich also auffallenderweise nicht im geringsten nach der Druckfestigkeit, denn hierin steht der Sandstein an zweitbestem Stelle, im E-Werte aber an letzter. Der Buntsandstein hat also auffallenderweise

große Festigkeit und trotzdem ein weiches, nachgiebiges Verhalten, ist also zähe, während der Beton als spröde angesprochen werden muß.

Als Ausdruck für die Zähigkeit darf man den Ausdruck $z = \frac{\sigma_B^2}{E}$ betrachten. Hiernach berechnet sich für die verschiedenen Prismen folgende Zähigkeit:

	Mörtel 1 : 2 Mauerwerks-Prismen aus			Stampfbeton- Prismen aus Splitt	
	Granit	Sandstein	Kalkstein	1 : 5	1 : 6
Zähigkeit . . .	1,07	1,91	0,41	0,26	0,18
Bezogen auf Granit	1	1,78	0,38	0,24	0,17

Sandstein ist hiernach noch um 78% zäher als Granit.

Der Beton 1:5 hat nur 24%, der Beton 1:6 gar nur 17% der Granitzähigkeit.

E. Vergleich der Mauerwerksfestigkeit mit der Stein- und Mörtel-Würzelfestigkeit.

Bedauerlicherweise ist es bei der Durchführung der Versuche nicht gelungen, den für die einzelnen Mauerwerksprismen immer wieder frisch hergestellten Mörtel trotz der genau vorgeschriebenen Sandzusammensetzung und des Wassersatzes mit einer solch hohen Festigkeit herzustellen, wie sie bei den Vorversuchen erreicht wurde. Die Würzelfestigkeit nach 28 Tagen betrug damals 619 und 646 kg/cm² bei der Mischung 1:3 und 593 und 604 bei der Mischung 1:4, während der später hergestellte Mauerwerksmörtel 1:3 nur noch Festigkeiten von 500—435 und der Mörtel 1:4 von 389 bis herunter zu 186 kg/cm² aufweist. Es ist daher leider nicht einwandfrei möglich, eine Abhängigkeit der Mauerwerksfestigkeit von der Mörtelfestigkeit abzuleiten, da bei jeder Versuchsreihe der Mörtel eine andere Festigkeit hatte. Indem man jedoch den Vergleich zwischen der jeweils erzielten Mauerwerksfestigkeit gegenüber der gerade vorhandenen Würzelfestigkeit anstellt und errechnet, um wieviel Prozent sich in dem großen und dazu noch prismaticen Mauerwerkskörper trotz seiner geometrisch ungünstigen Form die Gesamtfestigkeit erhöht hat gegenüber dem geometrisch günstigeren kleinen Mörtelwürfel, kann man doch ein einigermaßen zutreffendes Bild gewinnen, das Rückschlüsse auf andere ähnlich gelagerte Verhältnisse gestattet.

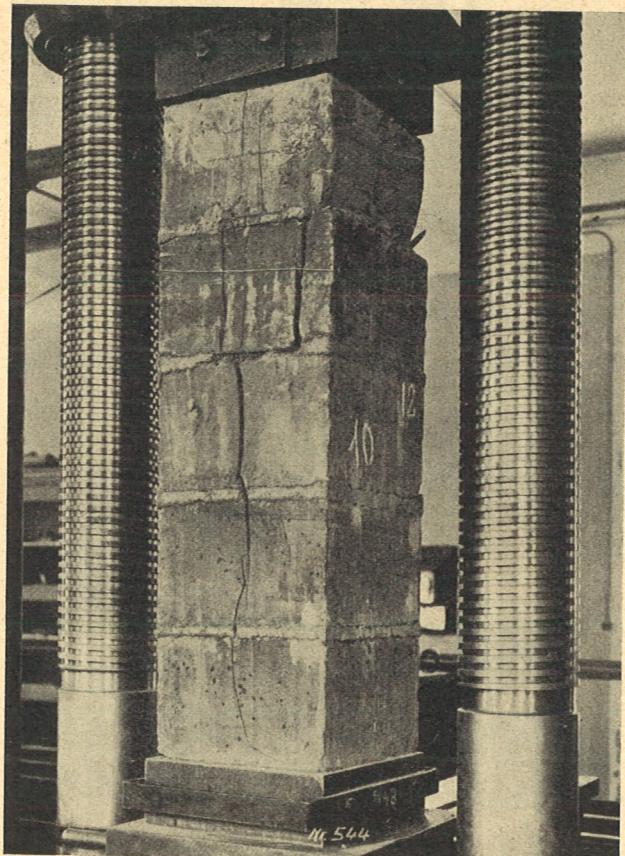


Abb. 12. Mauerwerksprisma aus Sandstein mit Sandsteinquadern mit 2 cm weiten Fugen mit hochwertigem Zementmörtel nach der Zerstörung durch die 500-t-Presse. Der lotrechte Längsriss ist auf der Vorderseite deutlich sichtbar.

Mörtel	Lagerfuge	Mauerwerksfestigkeit als Prozentsatz der Mörtelfestigkeit			%
		Granit	Sandstein	Kalkstein	
1:3	3 cm rauh	134	—	—	%
1:3	2 cm rauh	133	107	—	%
1:3	3 cm glatt	—	68	—	%
1:3	2 cm glatt	—	73	121	%
1:4	3 cm rauh	151	—	—	%
1:4	2 cm rauh	133	—	—	%
1:4	2 cm glatt	—	—	163	%

Bei Granit und Kalkstein bringt die große Gesteinsfestigkeit hiernach beim Mauerwerk prozentual einen größeren Gewinn beim weniger fetten Mörtel 1:4 als beim guten Mörtel 1:3. Das Sandsteinmauerwerk fällt wiederum aus der Rolle, da es infolge mangelhafter Herstellung bei zwei Reihen weniger Festigkeit hat als früher der Mörtelwürfel.

Der Gewinn an Festigkeit ist allgemein beim Mauerwerk natürlich größer, als ihn diese Zahlen angeben. Die Prozentzahlen würden sofort anwachsen, wenn man zum Vergleich nicht die Würzelfestigkeit, sondern die Prismenfestigkeit des Mörtels heranziehen könnte.

Da zu den Mauerwerksquadern einheitliche Blöcke verwendet wurden, weist die Gesteinsfestigkeit an den 20 cm-Würfeln nicht solche Unterschiede auf, wie sie beim Mörtel festgestellt werden mußten. Es ist beachtenswert, um wieviel Prozent diese an 20 cm-Würfeln festgestellte Gesteinsfestigkeit durch den weniger festen Fugenmörtel beim Mauerwerk gefallen ist. In folgender Liste ist für jede Prismengattung daher angegeben, wieviel Prozent der Gesteinsfestigkeit beim Mauerwerksprisma als Mittel aus drei Versuchen gefunden wurde.

Mörtel	Lagerfuge	Granit	Sandstein	Kalkstein	
1:3	3 cm rauh	47	—	—	%
1:3	2 cm rauh	46	53	—	%
1:3	3 cm glatt	—	39	—	%
1:3	2 cm glatt	—	42	49	%
1:4	3 cm rauh	46	—	—	%
1:4	2 cm rauh	31	—	—	%
1:4	2 cm glatt	—	—	47	%

Die Feststellung, daß bei Verwendung von weniger gutem Fugenmörtel die Mauerwerksfestigkeit abnimmt, bringt nichts Neues, aber es überrascht vielleicht, daß mit dem guten Fugenmörtel 1:3 sich

nahezu die Hälfte der Gesteinswürzelfestigkeit im prismatischen Mauerwerk erreichen läßt. Man wird beim hochwertigen Sandstein- und Kalkstein-Mauerwerk nach diesen Feststellungen, die sich mit meiner Bauerfahrung decken, 2 cm weite Fugen, beim Granit aber 3 cm weite Fugen und immer rauhe Lagerflächen verwenden. Für diese Fälle ergaben die Versuche für Granit-, Sandstein-, Kalkstein-Mauerwerk rd. 48 — 53 — 49 % der Steinfestigkeit, obwohl aus der guten Mörtelmischung beim Vermauern nicht besonders hohe Festigkeiten herausgeholt worden waren.

Bei den Betonprismen verursachte das Anwachsen der Prismenhöhe auf 50 cm gegenüber der Betonwürfelhöhe von 30 cm einen Verlust an Druckfestigkeit, der zwischen 6 und 37 % schwankt und im Mittel 22 % beträgt. Der Beton mit Rheinkies als Zuschlag büßte an Festigkeit mit anwachsender Prismenhöhe 31 %, also erheblich mehr als der mit Porphyrsplitt, dessen Verlust nur 13 % betrug. Der Verlust wird umso größer, je weniger fett der Beton ist; denn beim Rheinkiesbeton beträgt der Verlust bei der Mischung 1:5 nur 27 %, bei der Mischung 1:6 aber 36 %, während die ähnlichen Zahlen für den Porphyrsplitt 11 und 14 % sind.

Auch bei den Mauerwerksprismen war natürlich schon durch das Anwachsen der Prismenhöhe auf 50 cm gegenüber der Würfelhöhe von nur 20 cm eine beträchtliche Einbuße an Festigkeit gegenüber dem Stein zu erwarten, d. h. die folgenden Zahlen wären bestimmt um 20 % kleiner, wenn man zum Vergleich die Gesteinsfestigkeiten nicht am 20 cm hohen Steinwürfel, sondern am 50 cm hohen Steinprisma heranziehen könnte.

Besonders bei den Versuchen mit den Sandsteinprismen wurde es offensichtlich, daß rau bearbeitete Lagerfugen die Gesamtfestigkeit günstig beeinflussen, denn bei den 2 cm weiten glatten Lagerfugen betrug im Mittel die Mauerwerksfestigkeit nur 73 %, bei den 2 cm weiten, aber rauen Fugen 107 % der Mörtelfestigkeit. Bei den glatten Lagerflächen wurden von der Mörtelfestigkeit hier also 27 % eingebüßt, während sich durch die Rauhbehandlung ein Gewinn von 7 % ergab. Betrachtet man daher nur diejenigen Versuche, bei welchen die Lagerfugen aufgerauht waren, so ergibt sich folgender Gewinn an Mauerfestigkeit gegenüber der Mörtelfestigkeit:

	Granit	Sandstein	Kalkstein
Mörtel 1:3	33. u. 34 %	7 %	—
Mörtel 1:4	33. u. 51 %	—	—

Wenn man die Mauerwerksfestigkeiten auch einmal nach der Fugenweite ordnen will, so ergibt sich folgendes Bild:

Mörtel	Druckfestigkeit in kg/cm ²					
	Granit		Sandstein		Kalkstein	
1:3	1:4	1:3	1:4	1:3	1:4	
3 cm Fugenweite	596	586	339	—	—	—
2 cm Fugenweite	590	398	365 464	—	323	303

Die alte Erfahrung bewährt sich hier wieder, daß beim grobkörnigen Granit enge Fugen nicht

am Platze sind, während beim feinkörnigen Sandstein und Kunststein die Fugen nicht zu weit sein dürfen. Bei beiden Mörtelmischungen bringt die 3 cm weite Fuge beim Granitmauerwerk regelmäßig die größte Festigkeit, anders als beim Sandstein, bei dem die enge Fuge regelmäßig der weiten überlegen ist. Für weitgespannte Gewölbe und andere hochwertige Bauglieder aus Mauerwerk sollte man daher an der alten Regel festhalten, bei Granit die Lagerfuge rauh und 3 cm weit, bei Sandstein und Kalkstein die Lagerfuge ebenfalls rauh, aber nur 2 cm weit zu machen. Der erdfeuchte Fugenmörtel läßt sich dann gut einstampfen und ergibt gute Festigkeiten.

F. Vergleich der Festigkeit von Mauerwerk und Beton.

Zu diesem Zwecke werden die erzielten Mauerwerksfestigkeiten noch einmal zusammengestellt

und mit den Festigkeiten der Betonprismen verglichen.

Mauerwerk			Granit		Sandstein		Kalkstein		
			kg/cm ²	Verhältnis	kg/cm ²	Verhältnis	kg/cm ²	Verhältnis	
Rauhe Fugen			3		2		2 *)		
Mörtel 1 : 4	Festigkeit in kg/cm ²	Mauerwerk	596		464		323		
		Mörtel . . .	443	$\frac{596}{443} = 1,34$	435	$\frac{464}{435} = 1,07$	266	$\frac{323}{267} = 1,21$	
		Stein	1280	$\frac{596}{1280} = 0,47$	875	$\frac{464}{875} = 0,53$	655	$\frac{323}{655} = 0,49$	
Mörtel 1 : 4	Festigkeit in kg/cm ²	Mauerwerk	586		—		303		
		Mörtel . . .	389	$\frac{586}{389} = 1,51$	—		186	$\frac{303}{186} = 1,63$	
		Stein	1280	$\frac{586}{1280} = 0,46$	—		655	$\frac{303}{655} = 0,46$	
Beton			Rheinkies		Porphyrsplitt		*) glatte Fugen.		
			kg/cm ²	Verhältnis	kg/cm ²	Verhältnis			
1 : 5 Stampfbeton	Festigkeit in kg/cm ²	Festigkeit	152		272				
		Gußbeton	119	$\frac{152}{119} = 1,28$	179	$\frac{272}{179} = 1,52$			
1 : 6 Stampfbeton	Festigkeit in kg/cm ²	Festigkeit	97		217				
		Gußbeton	85	$\frac{97}{85} = 1,14$	136	$\frac{217}{136} = 1,60$			

Weil das Gießen 10 bis 59% Einbuße an Festigkeit gegenüber dem Stampfen bringt, sei zunächst nur der Stampfbeton mit dem Mauerwerk ver-

glichen, wobei die Festigkeit des Granitmauerwerks mit 3 cm weiten, rauen Fugen und Mörtel 1:3 als Einheit betrachtet wird.

		Festigkeit	Reihenfolge der Güte	Verhältnis		
Granit	Mauerwerk 1:3	596	1	1		
Sandstein	" 1:3	464	2	0,78	1	
Kalkstein	" 1:3	323	3	0,54	0,70	1
Porphyrsplitt	Stampfbeton 1:5	272	4	0,46	0,59	0,84
	Gussbeton 1:5	179	6	0,30	0,39	0,55
Rheinkies	Stampfbeton 1:5	152	7	0,25	0,33	0,47
	Gussbeton 1:5	119	9	0,20	0,26	0,37
Porphyrsplitt	Stampfbeton 1:6	217	5	0,36	0,47	0,67
	Gussbeton 1:6	136	8	0,23	0,29	0,42
Rheinkies	Stampfbeton 1:6	97	10	0,16	0,21	0,30
	Gussbeton 1:6	85	11	0,14	0,18	0,26

Der Vergleich der Druckfestigkeiten fällt für den Guß- und Stampfbeton nicht gut aus, trotzdem beim Mauerwerk der Fugenmörtel offenbar nicht besonders fest war. Es erreicht der Beton in keinem einzigen Fall die Festigkeit eines Mauerwerkskörpers. Die Druckfestigkeit des besten Betonprismas, Stampfbeton 1:5 mit Porphyrsplitt und Kieszugabe als Zuschlag, beträgt mit 272 kg/cm² noch nicht die Hälfte der Festigkeit des Granitmauerwerks, nicht 60 % der des Sandstein- oder nicht einmal 85 % der des Kalksteinmauerwerks.

Der hier verwendete Muschelkalkstein zeichnet sich vor dem Granit und dem Buntsandstein durch einen im Verhältnis zu seiner geringen Steinwürfelfestigkeit von rd. 655 kg/cm² außergewöhnlich hohen Elastizitätsmodul von rd. 360 000 kg/cm² ab, welcher also 2,3 mal so groß ist wie der des Sandsteins mit 158 000 und auch noch einiges größer als der des Granits mit 350 000. Der Kalkstein ist spröde und verbindet mit einer verhältnismäßig geringen Druckfestigkeit eine kleine Dehnungsfähigkeit. Sie offenbart sich auch beim Druckversuch dadurch, daß die Mauerwerksprismen wie die Steinwürfel ohne vorheriges Anzeichen wie Absplittern der Kanten oder Auftreten feiner Risse mit einem heftigen Knall und einer verhältnismäßig steil liegenden Bruchfläche zerstört werden. Der grundsätzliche Unterschied zwischen dem besonders gut federnden, weichen und nachgiebigen Sandsteinmauerwerk und dem glasigen spröden Kalkstein zeigte sich an zwei anderen Versuchen mit Mauerwerksprismen aus 5 Quadern 30/30/17½ cm, welche mit reichlich 3 cm Fugenweite 100 cm hoch waren. Trotz der guten Würffelfestigkeit des Fugenmörtels 1:3 von 401 kg/cm² betrug die Prismenfestigkeit des Kalksteinmauerwerks nur 327 kg/cm², also nur 82 % des Mörtels. Beim Sandstein hingegen war bei diesen Sonderversuchen die Mauerwerksprismenfestigkeit von 404 kg/cm², also von 136 % des verhältnismäßig wenig guten Fugenmörtels von 297 kg/cm² erzielt worden.

G. Vergleich der Elastizität von Mauerwerk und Beton.

Nach unseren zahlreichen Versuchen an Steinwürfeln kann man folgende E-Mittelwerte für den Spannungsbereich unterhalb 75 kg/cm² annehmen:

Steinwürfel aus	Granit	Sandstein	Kalkstein	
E-Wert	350 000	150 000	360 000	kg/cm ²
1. Vergleich . .	1	0,43	1,03	
2. Vergleich . .	2,56	1	2,4	

Diese Reihenfolge im E-Wert steht in scharfem Gegensatz zu der Reihenfolge der Druckfestigkeit, welche betrug

Steinwürfel aus	Granit	Sandstein	Kalkstein	
Bruchfestigkeit	1280	875	655	kg/cm ²
1. Vergleich . .	1	0,68	0,51	
2. Vergleich . .	1,46	1	0,75	

Die Bruchfestigkeit des Kalksteins beträgt also nur rd. 51 % der des Granits, und trotzdem ist sein Elastizitätsmodul um 3 % größer. Die Kalksteinfestigkeit beträgt nur $\frac{3}{4}$ der des Sandsteins. Sein Elastizitätsmodul aber ist der 2,4fache jenes.

Um nun das elastische Verhalten des Mauerwerks mit dem des Betons vergleichen zu können, seien die E-Werte für das in der Anwendung vorteilhafte Mauerwerk mit 2 und 3 cm weiten rauen Fugen und einem Fugenmörtel 1:3 noch einmal zusammengeschrieben.

	E-Wert	Reihenfolge	Verhältnis			
Granit-Mauerwerk 1:3	371 000	11	1			
Sandstein-Mauerw. 1:3	79 000	1	0,21	1		
Kalkstein-Mauerw. 1:3	257 000	9	0,69	3,3	1	
Porphyrsplitt						
Stampfbeton 1:5	289 000	10	0,78	3,6	1,12	1
Gussbeton 1:5	246 000	7	0,66	3,1	0,96	0,85
Rheinkies						
Stampfbeton 1:5	212 000	5	0,57	2,7	0,83	0,73
Gussbeton 1:5	185 000	4	0,50	2,3	0,72	0,64
Porphyrsplitt						
Stampfbeton 1:6	260 000	8	0,70	3,3	1,01	0,90
Gussbeton 1:6	225 000	6	0,61	2,8	0,88	0,78
Rheinkies						
Stampfbeton 1:6	140 000	3	0,38	1,8	0,54	0,48
Gussbeton 1:6	132 000	2	0,36	1,7	0,51	0,46

Es ist auffallend, daß das Sandsteinmauerwerk auch im Vergleich mit dem Beton weitaus den kleinsten Elastizitätsmodul besitzt. Es ist also nachgiebiger als der Beton 1:5 und 1:6, selbst wenn dieser gegossen wird. Es verhält sich daher gegenüber der Wärmeeinwirkung wesentlich günstiger als alle andern Mauerwerks- und Betonarten. Wenn man den Wärmeausdehnungskoeffizienten dieser Mauerwerksarten ungefähr gleich groß annimmt^{*}), so treten beim Sandsteingewölbe z. B. die Wärmespannungen nur in der Größe von

^{*} genauere Zahlen s. S. 19

$\frac{1}{3}$ gegenüber dem Kalkstein- und $\frac{1}{2}$ gegenüber dem Granitgewölbe auf.

Alle untersuchten Betonarten haben in der Regel einen kleineren E-Wert als Granit- und Kalksteinmauerwerk. Nur der gute Stampfbeton 1:5 oder 1:6 aus Porphyrsplitt hat ungefähr den gleichen E-Wert wie das Kalksteinmauerwerk und nähert sich sogar dem Granitmauerwerk.

Innerhalb der Betonprismen bringt der Rheinkies im Vergleich zum Splittbeton einen kleinen E-Wert, also große Dehnungen. Der Gußbeton ist stets weicher als der gleichfette Stampfbeton.

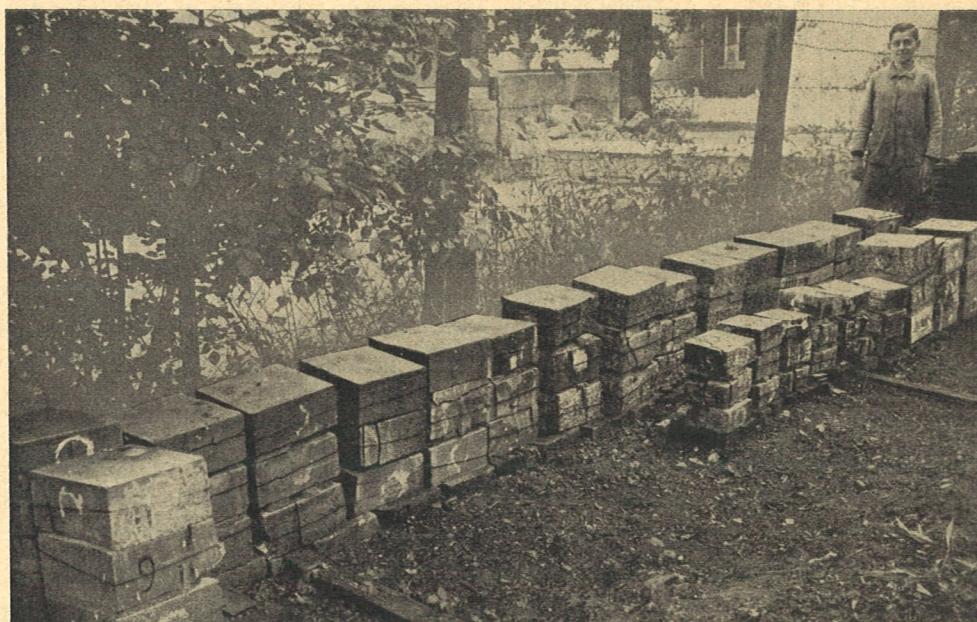


Abb. 13. Ueberblick über einen Teil der durch Druck zerstörten Mauerwerksprismen mit 20 und 30 cm Kantenlänge.

6. Versuche an Mauerwerkskörpern mit Lagerfugen und Stoßfugen.

An weiteren 6 Versuchskörpern wurde festgestellt, ob sich an den elastischen und Festigkeitseigenschaften von Quadermauerwerksprismen mit hochwertigem Zementmörtel durch Anordnen von Stoßfugen eine Änderung zeigt.

Es wurden aus dem gleichen Granit, wie früher mit 30 cm Seitenlänge Sandstein und Kalkstein je 2 Mauerwerksprismen hergestellt, welche aus 3 mit Mörtel 1:3 aufeinander gesetzten Quadern bestanden. Jede Quaderschicht war aber durch eine einzige Stoßfuge geteilt.

Es wurden ferner 2 Mauerwerkskörper aus einem anderen (Pfälzer) Sandstein (mit 740 kg/cm² Druckfestigkeit) hergestellt, bei welchen jede Schicht mit Mörtel 1:3 aus 4 Stücken zusammengestellt war.

Der Mörtel wurde nach der AMB (Anweisung für Mörtel und Beton) der Deutschen Reichsbahn-

gesellschaft entsprechend einem Mischungsverhältnis 1:3 RT hergestellt. Er ergab nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 420 kg/cm².

Als Zement wurde hochwertiger Heidelberger Portlandzement verwendet. Die Normendruckfestigkeit dieses Zementes nach 28 Tagen wurde an 6 Würfeln von 7 cm Kantenlänge zu 508 kg/cm² bestimmt.

Alle Körper wurden wie früher unter Dehnungsmessungen zu Bruch gebracht.

Die Druckfestigkeiten betrugen im Mittel

Mauerwerk aus	Druckfestigkeit in kg/cm ²
Granit	563
Sandstein	513
Kalkstein	292
Sandstein	285

A. Elastisches Verhalten der Mauerwerkskörper.

Übereinstimmend mit den früheren Versuchen, bei welchen Mauerwerkskörper mit dem gleichen Mörtel und Stein, aber ohne Stoßfugen (nur mit Lagerfugen) untersucht wurden, zeigt sich der Sandsteinkörper erheblich weicher als der Granit- und Kalksteinkörper. Sandstein zeigt nach wie vor bei höheren Spannungen kleiner werdenden Zuwachs der Verkürzungen.

Überhaupt sind weder die Richtung (E-Wert) noch der Form nach die σ/ϵ -Linien durch die Anordnung einer Stoßfuge wesentlich beeinflußt.

Erst die Anordnung von mehreren Stoßfugen in einer Schicht zeigt starke Zunahme der Dehnung bei Sandstein, die allerdings z. T. wohl auch auf das Steinmaterial, das hier aus der Pfalz und nicht aus dem Neckartal stammte, zurückgeführt werden kann.

Die Elastizitätsmoduli für die einzelnen Mauerwerksarten wurden aus den federnden Zusammendrückungen für die Spannungen 0—100 kg/cm² errechnet und sind in der nachfolgenden Liste mit den übrigen ermittelten Festigkeitswerten zusammengestellt.

Mauerwerk aus	Mörtelwürfel-festigkeit kg/cm ²	Steinwürfel-festigkeit kg/cm ²	Mauerwerks-festigkeit kg/cm ²	Mauerwerks-elastizi-tätsmaß kg/cm ²
Granit (Schwarzwälder)	398	1975	563	262 000
Sandstein (Neckartäler)	398	945	513	110 000
Kalkstein (Odenwälder)	398	521	292	248 000
Sandstein (Pfälzer)	398	740	285	62 800

B. Vergleich mit früheren Versuchen mit Mauerwerkskörpern ohne Stoßfugen.

In der folgenden Liste sind die Mittelwerte der Druckfestigkeiten von Steinwürfeln, Mörtelwürfeln und Mauerwerksprismen sowie die an Mauerwerksprismen ermittelten Elastizitätsmoduli zusammengestellt.

Mauerwerk aus	Art des Mauerwerks	Mittlere Druckfestigkeit von			Mittleres Elastizitätsmodul von Mauerwerksprisma kg/cm ²
		Steinwürfel kg/cm ²	Mörtelwürfel kg/cm ²	Mauerwerksprisma kg/cm ²	
Granit	nur Lagerfugen	1280	443	596	330 000
	nur Lagerfugen	1975	400	814	235 000
	eine Stoßfuge	1975	398	563	262 000
Neckartäler Sandstein	nur Lagerfugen	875	435	464	79 000
	nur Lagerfugen	945	420	530	115 000
	eine Stoßfuge	945	398	285	110 000
Pfälzer Sandstein	mehrere Stoßfugen	740	398	285	62 800
Kalkstein	nur Lagerfugen	655	266	303	257 000
	nur Lagerfugen	521	404	429	347 000
	eine Stoßfuge	521	398	292	248 000

Hiernach hat die Anordnung der Stoßfugen weder die Festigkeit noch das elastische Verhalten der Mauerwerkskörper in erheblichem Maße beeinflußt.

7. Zusammenfassung.

Im großen und ganzen und unter Berücksichtigung der nicht unerheblichen Streuungen betrugen die mit Mörtel aus hochwertigem Zement und den gegebenen Steinen erzielten Festigkeiten der Mauerwerksprismen:

aus Granit 600 kg/cm², das sind
50 % der Steinwürzelfestigkeit und
150 % der Mörtelwürzelfestigkeit,

aus Sandstein 450 kg/cm², das sind
50 % der Steinwürzelfestigkeit und
100 % der Mörtelwürzelfestigkeit,

aus Kalkstein 380 kg/cm², das sind
50 % der Steinwürzelfestigkeit und
90 % der Mörtelwürzelfestigkeit.

Es wurde i. A. die halbe Steinwürzelfestigkeit als Mauerwerksprismenfestigkeit nutzbar gemacht, der Mörtel wurde dabei bei Granitmauerwerk weit über seine Würzelfestigkeit hinaus, bei Sandstein- und Kalksteinmauerwerk etwa mit seiner Würfeldruckfestigkeit beansprucht.

Die Mauerwerksfestigkeiten wurden von den formgleichen Körpern aus Beton 1:5 und 1:6 bei weitem nicht erreicht, denn es ergab sich

	Stampfbeton	Gußbeton
aus Porphyrsplitt 1:5	270 kg/cm ²	180 kg/cm ²
" " 1:6	220 "	140 "
aus Rheinkies 1:5	150 "	120 "
" " 1:6	100 "	85 "

Die Elastizitätszahlen betragen im großen und ganzen bei Mauerwerk

aus Granit 223 000—372 000, beim Stein 350 000

Sandstein 75 000—115 000, 148 000

Kalkstein 246 000—347 000, 360 000

Die elastischen Eigenschaften des Mörtels scheinen das Mauerwerk mehr zu beeinflussen als die Festigkeiten, d. h. weniger guter Mörtel setzt die Festigkeit des Mauerwerks nicht so sehr herab wie den Elastizitätsmodul.

Die E-Werte des Betons betragen

	Stampfbeton	Gußbeton
Porphyrsplittbeton 1:5	290 000	245 000
" 1:6	260 000	225 000
Rheinkiesbeton 1:5	210 000	185 000
" 1:6	140 000	130 000

Gemessen an den E-Werten des Betons sind die E-Werte des Steinmauerwerks aus Granit und Kalkstein höher. Sandsteinmauerwerk ist aber weicher als der weichste dieser Betonarten. Beim Beton ist der festeste Beton auch der elastisch härteste, während beim Mauerwerk — und auch schon beim Stein an sich — der sehr hart federnde spröde Kalkstein die kleinste Druckfestigkeit aufwies.

Der E-Modul des Mauerwerks ist in erster Linie vom E-Modul des Steins abhängig; beim Beton dagegen spielen die elastischen Eigenschaften des Zuschlags fast keine Rolle gegenüber Wasserkementfaktor und Mörtelgehalt.

Der günstige Einfluß der Aufrauhung der zusammengemörtelten Steinflächen zeigt sich deutlich. Bei der Fugenweite hat sich die alte Regel bewährt, daß man dem Granitmauerwerk am besten 3 cm weite, dem Sandstein- und Kalksteinmauerwerk 2 cm weite Fugen gibt.

Praktische Schlußfolgerung.

Aus den hier beschriebenen und andern in unserer Versuchsanstalt durchgeföhrten Versuchen lassen sich Schlußfolgerungen ziehen, welche für die künftige Verwendung des Natursteins für hochwertige Bauwerke wie Gewölbe u. dgl. vielleicht förderlich sind.

1. Die Mauerwerksfestigkeit wird bei Körpern, die wie hier zusammengesetzt sind, viel mehr von der Steinfestigkeit als von der Mörtelfestigkeit beeinflußt. Der Einfluß des Mörtels ist bisher überschätzt worden.
2. Das Vorhandensein von Stoßfugen beim Quadermauerwerk beeinflußt weder die Festigkeit noch das elastische Verhalten in erheblichem Maße.
3. Rauhe Fugen sind für die Festigkeit günstiger als glatte.
4. Bei richtiger Arbeit kann die Prismenfestigkeit des Mauerwerks bis zur halben Würzelfestigkeit des Steines ansteigen.
5. Die vom Quadermauerwerk erreichten Festigkeiten sind höher als die mit gleichwertigem Beton erreichbaren.
6. Die zulässigen Spannungen beim unbewehrten Betongewölbe betragen nach DIN 1075 rund $\frac{1}{4}$ der Prismenfestigkeit des Betons. Als Höchstwert ist bei Spannweiten über 60 m zugelassen 65 kg/cm².

Aus unseren Versuchen an den Prismen aus hochwertigem Beton und hochwertigem Mauerwerk würden sich bei vierfacher Sicherheit folgende zulässige Spannungen in runden Zahlen ergeben:

Porphyrsplitt: Stampfbeton 1:5 65 kg/cm², Gußbeton 1:5 45 kg/cm²,

Rheinkies: Stampfbeton 1:5 35 kg/cm², Gußbeton 1:5 30 kg/cm²,

Porphyrsplitt: Stampfbeton 1:6 50 kg/cm², Gußbeton 1:6 30 kg/cm²,

Rheinkies: Stampfbeton 1:6 25 kg/cm², Gußbeton 1:6 20 kg/cm².

Diese Spannungen sind recht gering.

7. Wollte man beim hochwertigen Quadermauerwerk sich ebenfalls wie beim Beton mit vierfacher Sicherheit begnügen, so wären folgende Spannungen zulässig.

Quadermauerwerk aus Granit

mit hochwert. Zementmörtel 1:3 140 kg/cm²

Quadermauerwerk aus Sandstein

mit hochwert. Zementmörtel 1:3 110 kg/cm²

Quadermauerwerk aus Kalkstein

mit hochwert. Zementmörtel 1:3 80 kg/cm²

Für Quadermauerwerk bei Gewölben läßt DIN 1075 jedoch nur zu

bei Stützweiten unter 60 m 50 kg/cm²,

bei Stützweiten über 60 m 65 kg/cm².

Man sollte dem Naturstein das gleiche Recht einräumen wie dem Beton. Es scheint unbedenklich bei regelmäßigem Schichten- oder Quadermauerwerk mit hochwertigem Zementmörtel folgende Spannungen im Gewölbebau zuzulassen:

Mauerwerk aus Granit	100 kg/cm ²
Mauerwerk aus Sandstein	80 kg/cm ²
Mauerwerk aus Kalkstein	60 kg/cm ² .

8. Der Vergleich der Druckfestigkeiten fällt für den Guß- und Stampfbeton nicht gut aus. In keinem Falle erreicht der Beton die Festigkeit eines Mauerwerkskörpers. Die Druckfestigkeit des besten Betonprismas erreicht noch nicht die Hälfte der Festigkeit des Granitmauerwerks und noch nicht 60 Prozent der des Sandsteinmauerwerks und noch nicht 85 Prozent der des Kalksteinmauerwerks.
9. Die übliche „Wärmeausdehnungszahl“ von 0,00001 für Beton gilt auch für Beton mit hochwertigem Zement und umfaßt tatsächlich alle Witterungseinflüsse. Die „Wärmeausdehnungszahl“ beträgt
 - bei Mauerwerk aus Granit 0,0000085
 - bei Mauerwerk aus Sandstein 0,000013
 - bei Mauerwerk aus Kalkstein 0,0000075.
10. Der Elastizitätsmodul im Bereich der zulässigen Spannungen beträgt gemittelt nach unseren Versuchen bei

Stampfbeton Gußbeton	
unt.Verwendung v. Splitt	300 000 250 000 kg/cm ²
unt.Verwendung v. Kies	200 000 175 000 kg/cm ²

 Bei Quadermauerwerk mit hochwertigem Zementmörtel beträgt der Elastizitätsmodul
 - bei Granit 350 000 kg/cm²,
 - bei Sandstein 80 000 kg/cm²,
 - bei Kalkstein 250 000 kg/cm².
 Für Schichtmauerwerk empfiehlt sich vielleicht
 - bei Verwendung von Granit der Elastizitätsmodul 300 000 kg/cm²
 - bei Verwendung von Sandstein der Elastizitätsmodul 80 000 kg/cm²
 - bei Verwendung von Kalkstein der Elastizitätsmodul 200 000 kg/cm².
11. Das Sandsteinmauerwerk besitzt nicht nur gegenüber Granit und Kalkstein sondern auch gegenüber dem Stampf- und Gußbeton den kleinsten Elastizitätsmodul. Es verhält sich darum gegenüber der Wärmewirkung auf Gewölbe wesentlich günstiger als alle andern Mauerwerks- und Betonarten.
12. Der für die Berechnung der Wärmespannungen maßgebende Wert: Elastizitätsmodul \times

Wärmeausdehnungszahl beträgt nach unsern Versuchen

	Stampf-Beton	Guß-Beton
bei Verwendung von Splitt $E \cdot \alpha_t =$	3	2,5 kg/cm ²
bei Verwendung von Kies $E \cdot \alpha_t =$	2	2 kg/cm ²

Beim Mauerwerk sind diese Werte

	Quadermauerwerk	Schichtmauerwerk
bei Verwendung von Granit $E \cdot \alpha_t =$	3	2,7 kg/cm ²
bei Verwendung v. Sandstein $E \cdot \alpha_t =$	1	1 kg/cm ²
bei Verwendung v. Kalkstein $E \cdot \alpha_t =$	2	1,5 kg/cm ²

Einschlägige Veröffentlichungen.

- 1) Materialzahlen für den Massivbau in hochwertigem Beton oder Mauerwerk, „Die Bau-technik“ 1933, Heft 46.
- 2) Festigkeit von Mörtelplatten aus hochwertigem Zement, „Beton und Eisen“ 1934, Heft 9.
- 3) Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit bei Naturgesteinen von der Kantenlänge der Steinwürfel, „Steinbruch und Sandgrube“ 1929, Nr. 16.
- 4) Schub- und Biegefestigkeit von Granit, „Der Bauingenieur“ 1929, Nr. 20/21.
- 5) Der Einfluß der Natursteinverkleidung auf die Festigkeit von Betonpfeilern, „Beton und Eisen“ 1930, Heft 16.
- 6) Neuere Gesteinsuntersuchungen der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen an der Technischen Hochschule Karlsruhe, „Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft“ 1930, Heft 6.
- 7) Beitrag zu „Architektur der Gegenwart“ (Akadem. Verlag Dr. Fritz Wedekind, Stuttgart 1927), IV: Der Ziegelbau, S. 88—99.
- 8) Die Versuchsanstalt für Holz, Stein und Eisen der Techn. Hochschule Karlsruhe, „Die Bau-technik“ 1925, Heft 16.
- 9) Bau und Berechnung gewölbter Brücken und ihrer Lehrgerüste. Berlin 1914 (J. Springer).
- 10) Kreuzungsbauwerk in Visé, Belgien, an der Kriegsbahn Tongeren—Aachen, „Organ f. d. Fortschritte des Eisenbahnwesens“ 1921, Heft 11 und 12.
- 11) Eine Straßenüberführung aus Eisenbeton über die badische Hauptbahn im Bahnhof Friederichsfeld, „Zentralblatt der Bauverwaltung“ 1915, Nr. 53 und 54.
- 12) Ausführung und Kosten der Maasbrücken in Visé (Kriegsbahn Aachen—Tongeren), „Der Bauingenieur“ 1920, Nr. 23 und 24.

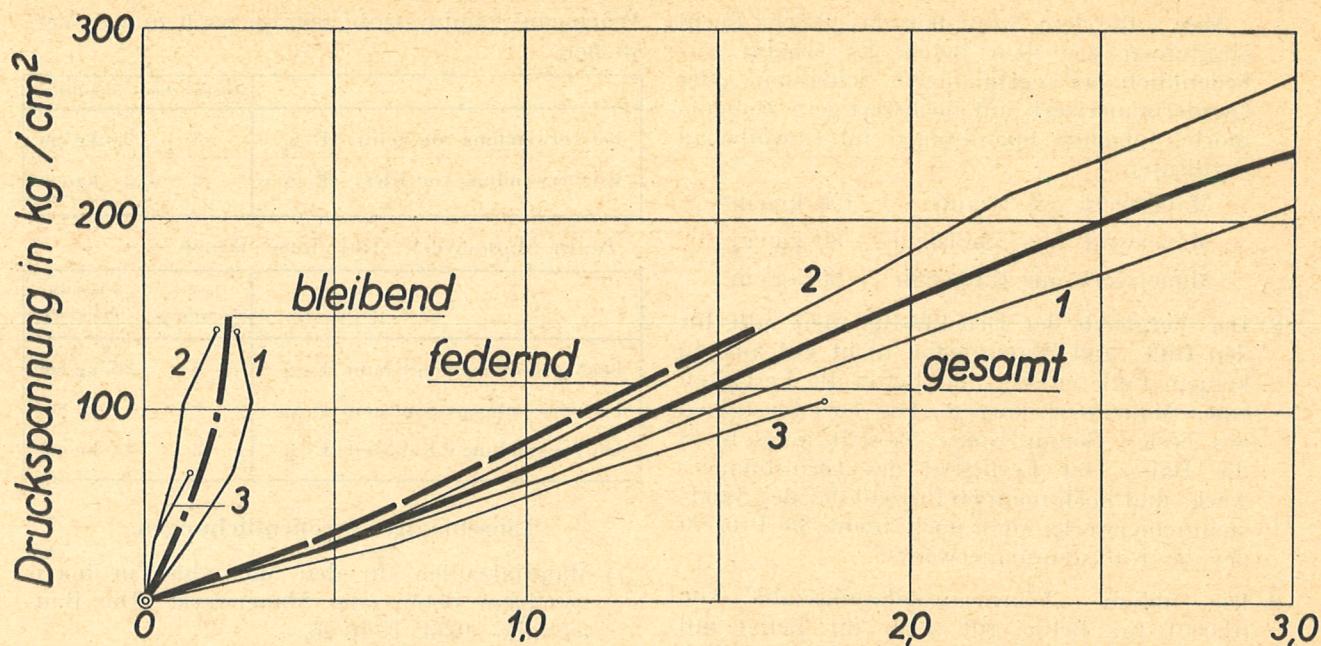


Abb. 14. Quadermauerwerk aus Sandstein, Einzel- und Mittellinien.

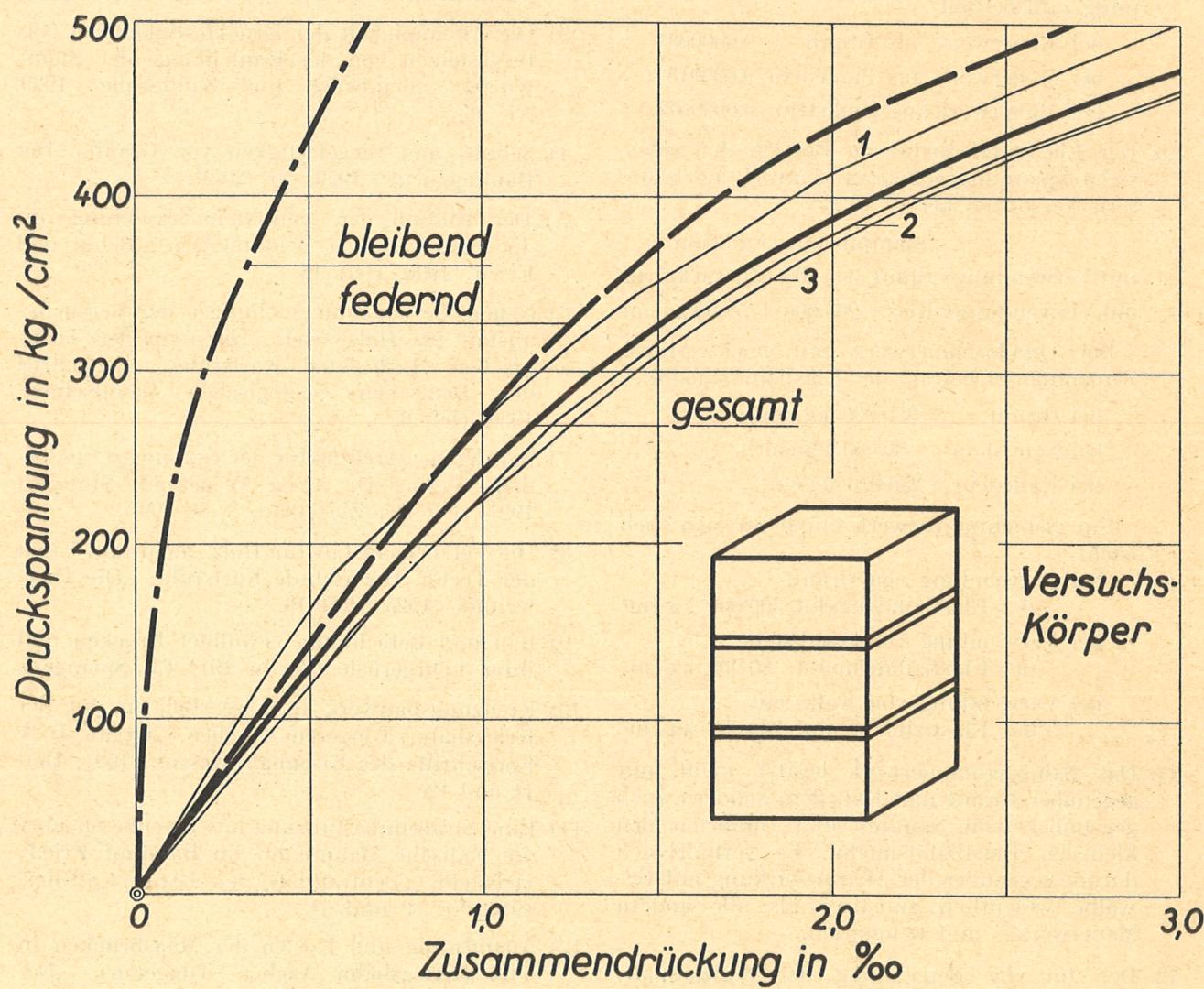


Abb. 15. Quadermauerwerk aus Granit, Einzel- und Mittellinien.

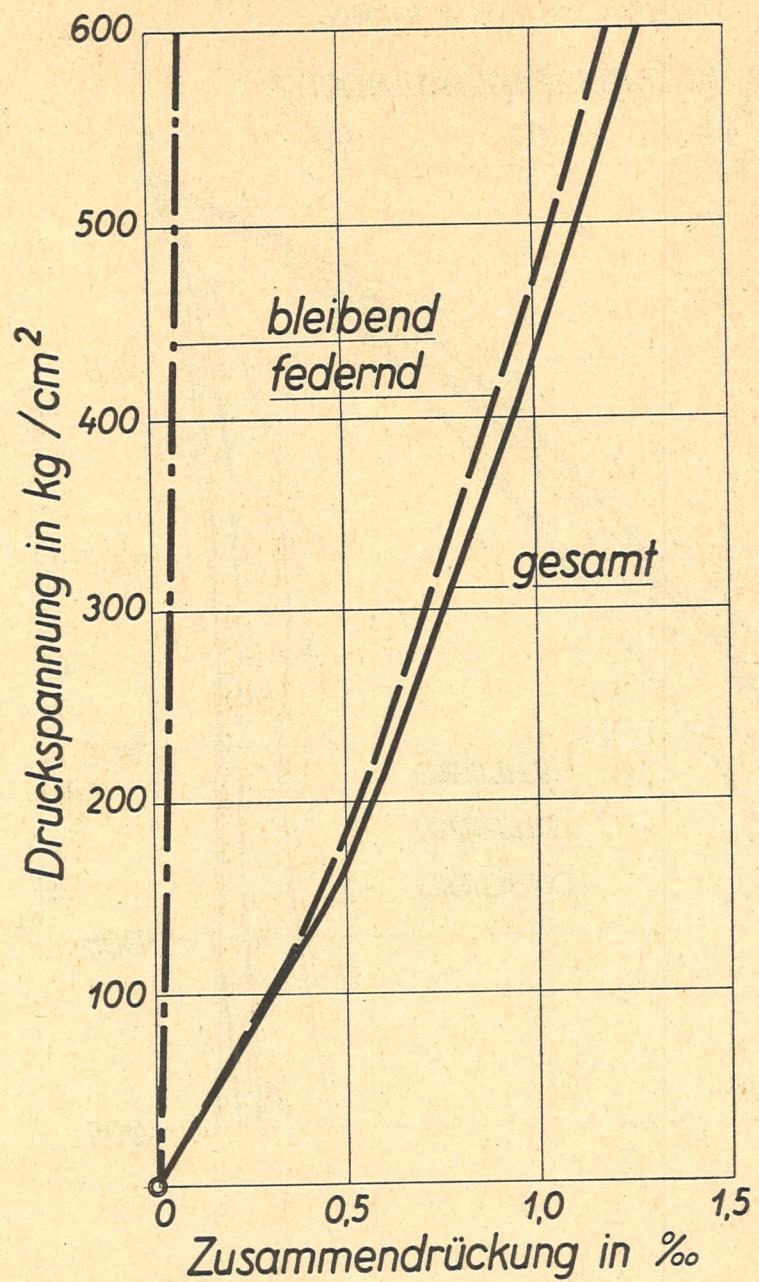


Abb. 16. Würfel aus Granit.

Bezeichnung	Quadergröße cm	Mörtel	Weite cm	Fuge Bearbeitung
V		1 : 3	3	rauh
VI	30/30/15	1 : 3	2	rauh
VII		1 : 4	3	rauh
VIII		1 : 4	2	rauh

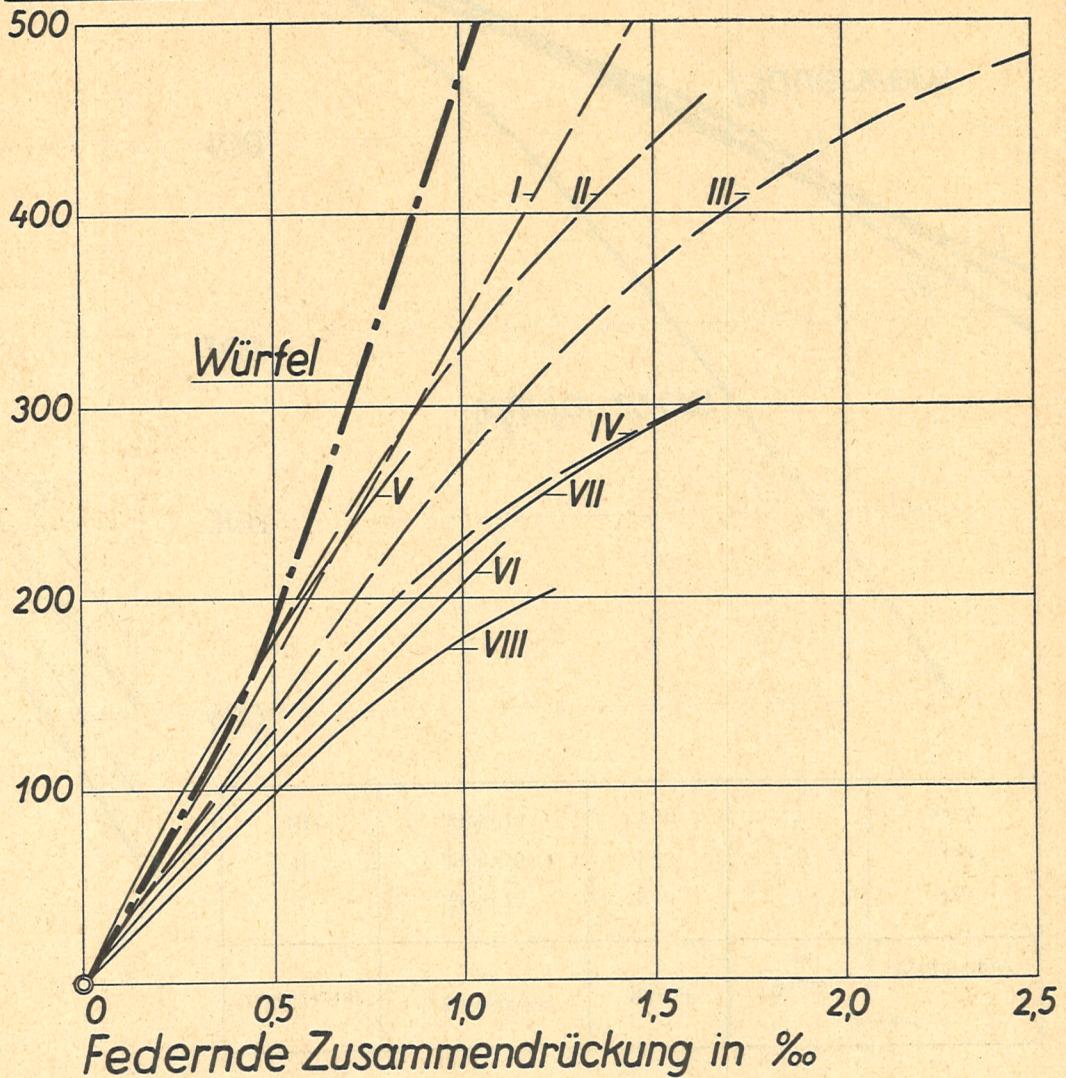


Abb. 17. Würfel und Mauerwerk aus Granit.

Bezeichnung	Quadergröße cm	Mörtel	Weite cm	Fuge
				Bearbeitung
I	30/30/15	1 : 3	3	glatt
II	30/30/15	1 : 3	2	glatt
III	30/30/15	1 : 3	2	rauh

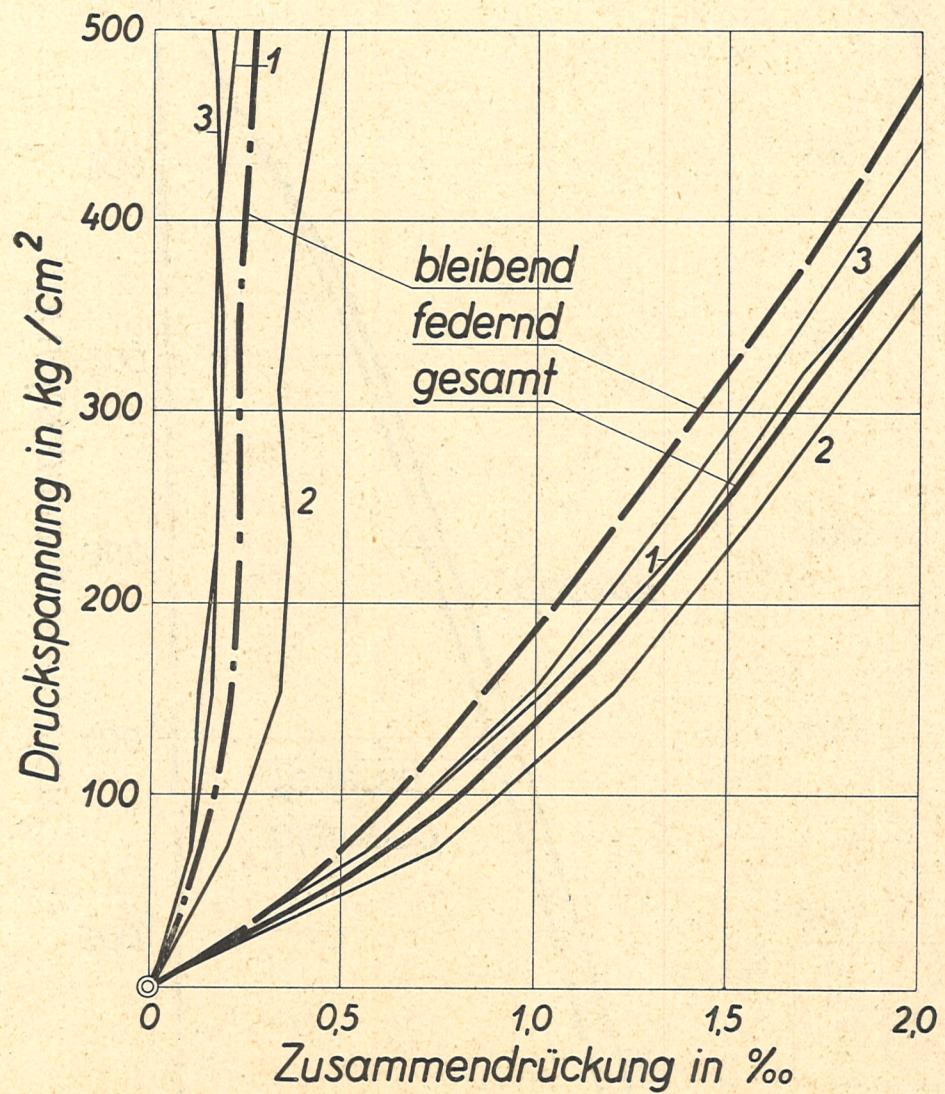


Abb. 18. Würfel aus Sandstein.

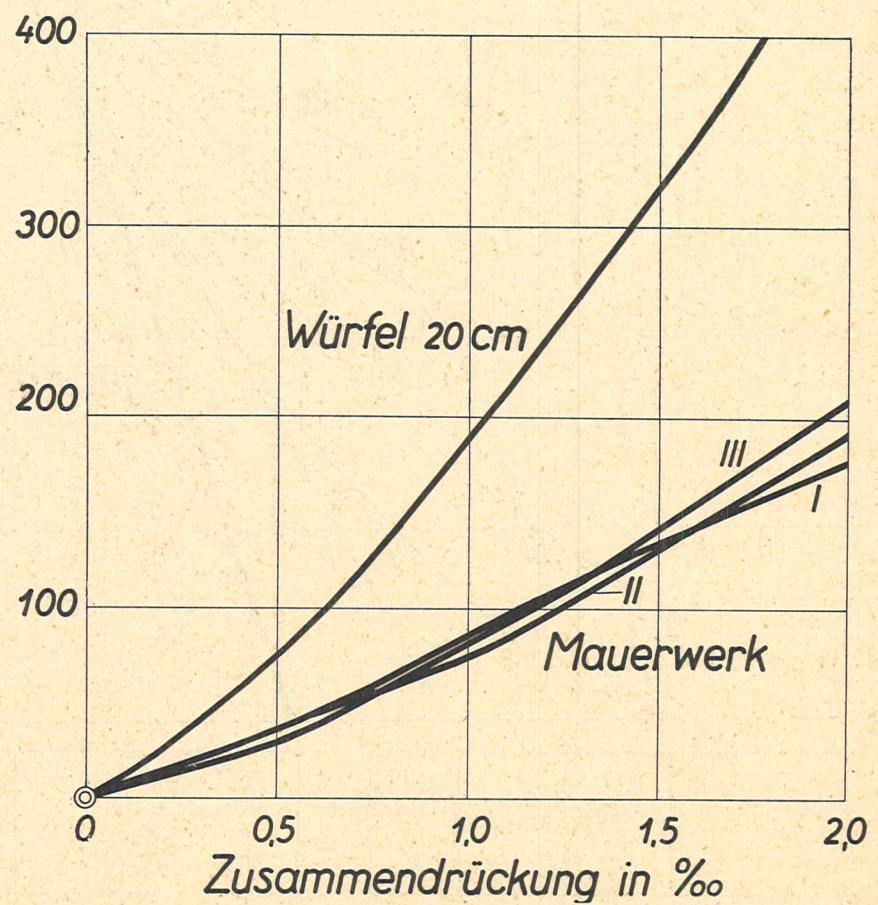


Abb. 19. Quadermauerwerk aus Sandstein.

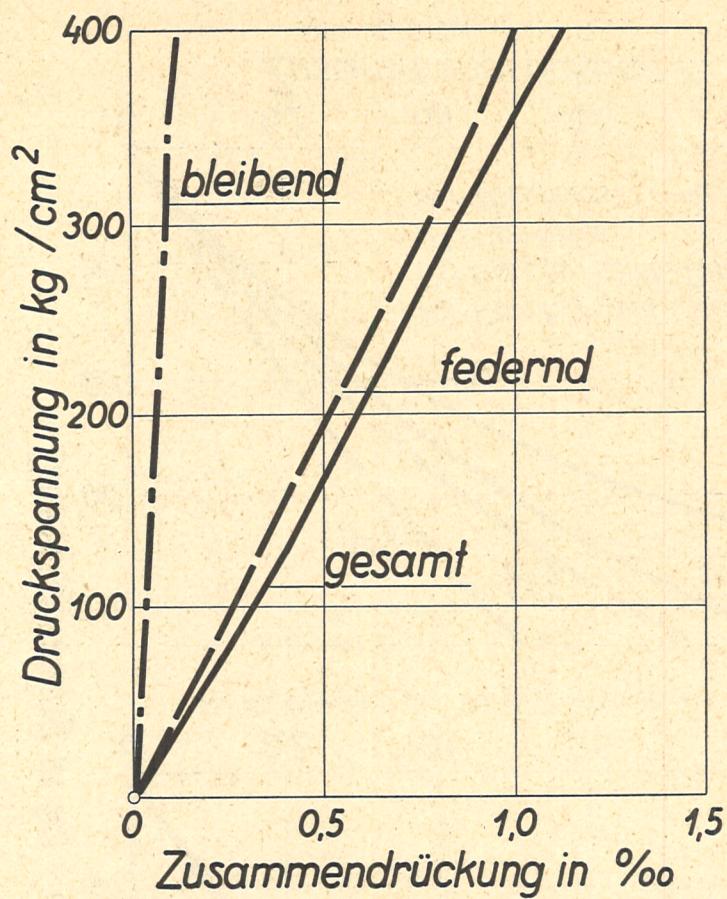


Abb. 20. Würfel aus Kalkstein.

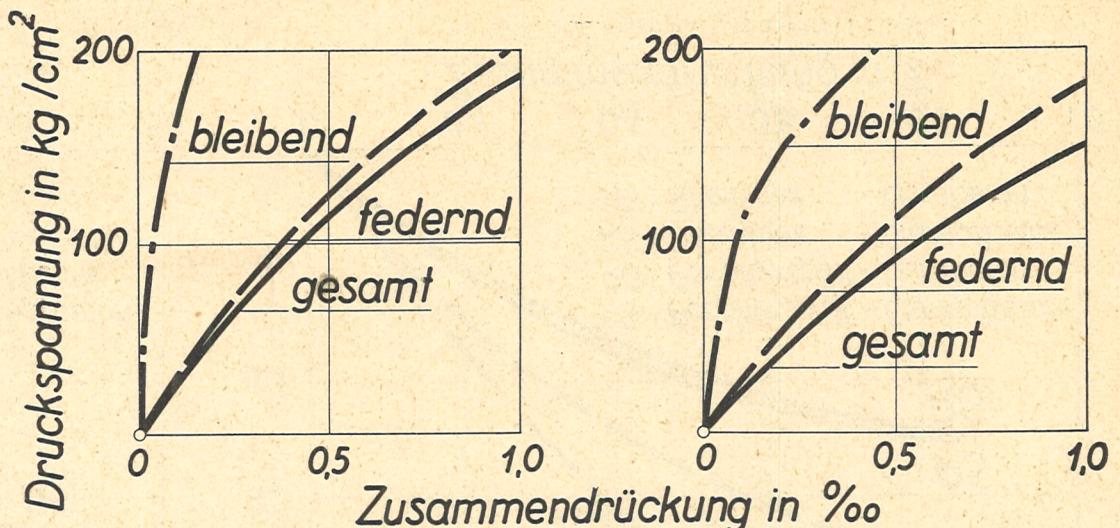


Abb. 21. Mauerwerk aus Kalkstein mit Mörtel 1 : 3.

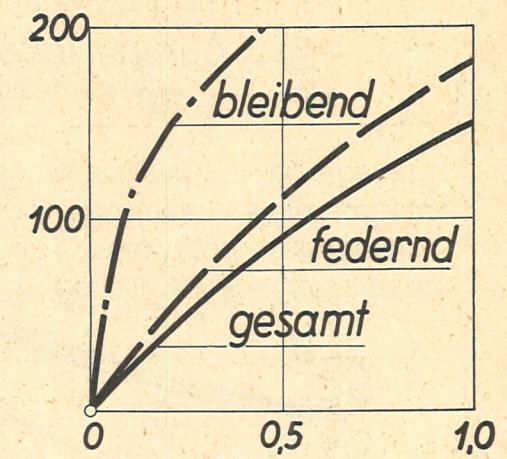


Abb. 22. Mauerwerk aus Kalkstein mit Mörtel 1 : 4.

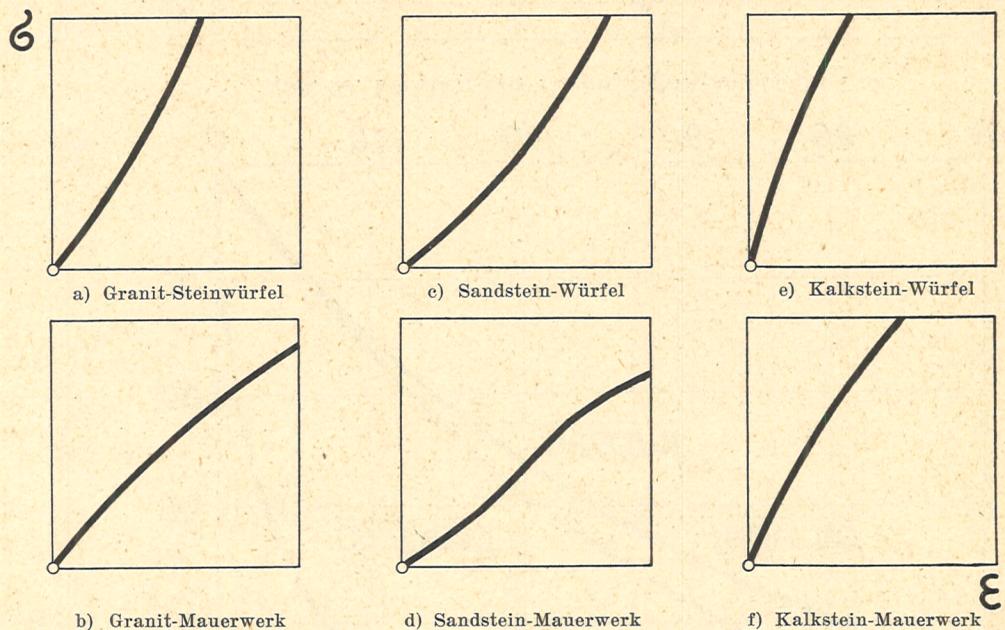


Abb. 23. Schematische Form der σ/ϵ -Linien.

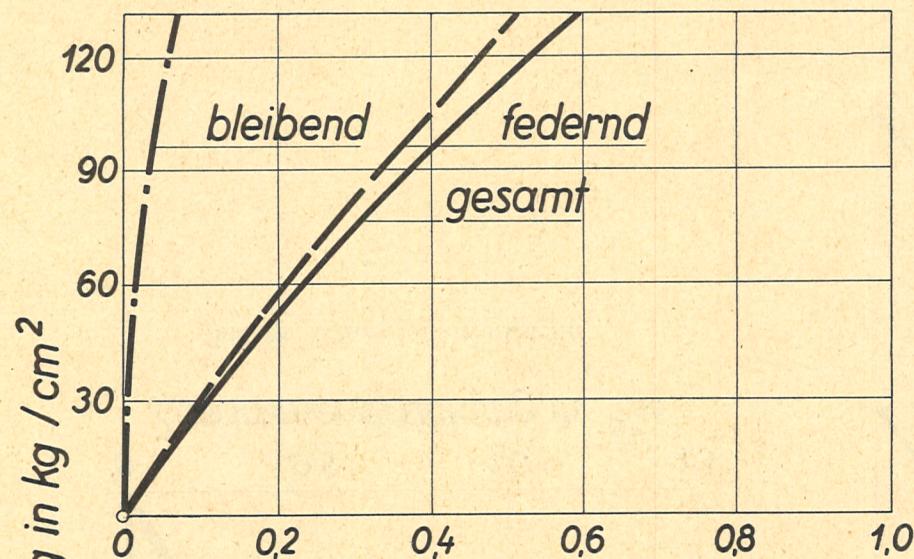


Abb. 24. Prismen aus Porphyrsplitt-Stampfbeton 1:5.

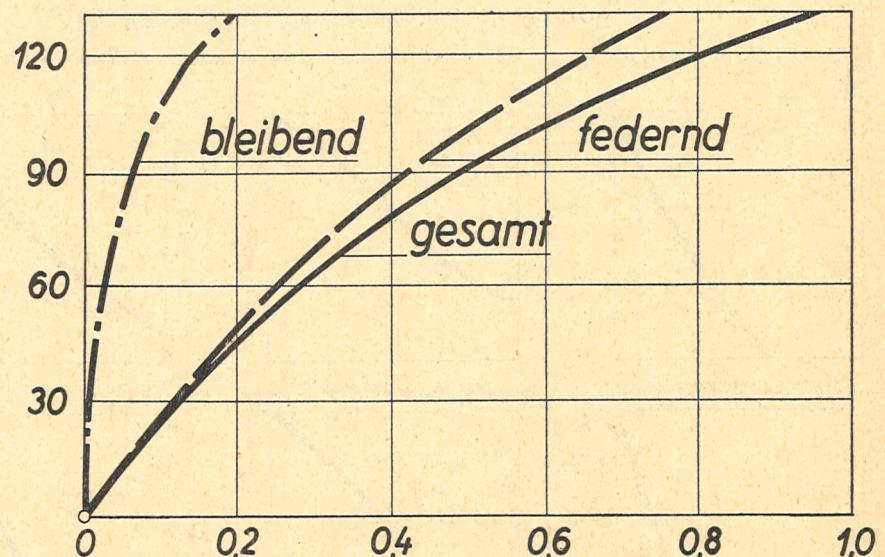


Abb. 25. Prismen aus Porphyrsplitt-Gussbeton 1:5.

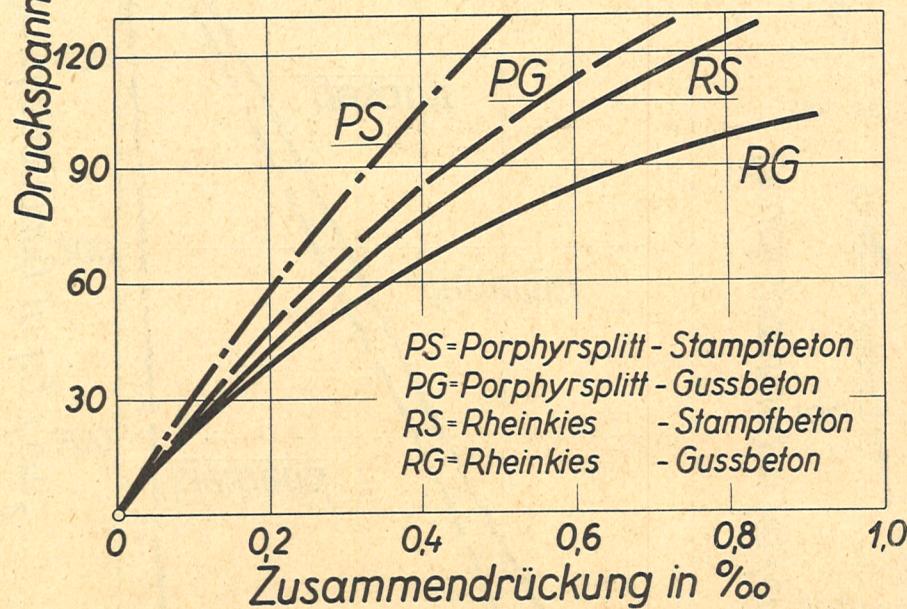


Abb. 26. Prismen aus Beton 1:5 RT.

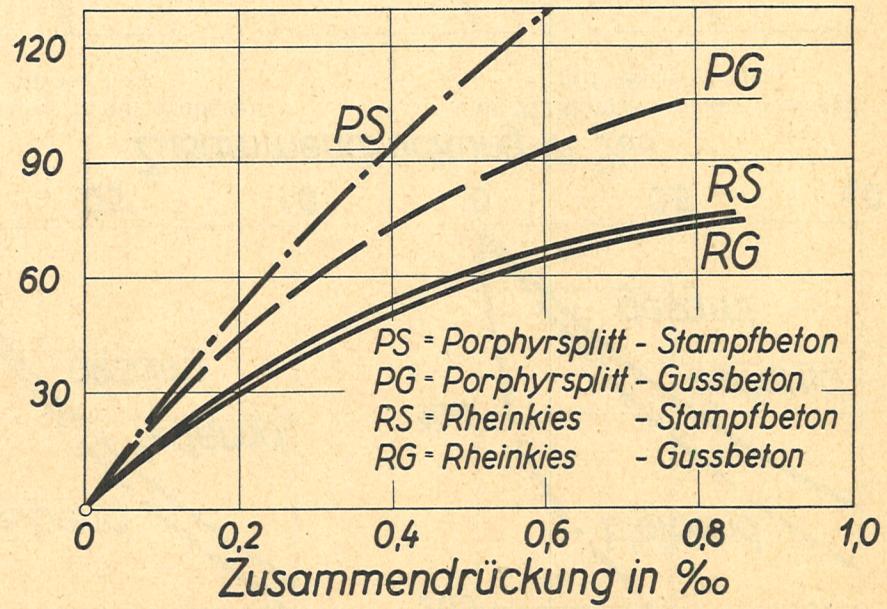


Abb. 27. Prismen aus Beton 1:6 RT.