

# Vorversuche und laufende Prüfungen von Beton für Grossbaustellen: Vortrag

Autor(en): **Bertschinger, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **77 (1959)**

Heft 16: **Schweizer Mustermesse: Basel, 11. bis 21. April 1959**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-84241>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Vorversuche und laufende Prüfungen von Beton für Grossbaustellen

DK 666.972:627.824.7

Vortrag von **H. Bertschinger**, dipl. Ing., Vicosoprano, gehalten anlässlich der Studientagung S. I. A. / SVMT / SNGT über aktuelle Betonprobleme in Locarno am 21. März 1958 und am österreichischen Betontag 1959 in Wien

Schluss von Seite 14

## III. Quantitative Bestimmung von Wirkungen verschiedener Ursachen auf die Betonqualität

## A. Anordnung und statistische Auswertung von Laboratoriumsversuchen

1. *Allgemeines.* Die quantitative Wirkung der Variation verschiedener Ursachen auf die Betonqualität kann mit Versuchsreihen im Laboratorium bestimmt werden durch Veränderung jeder einzelnen Ursache in mehreren Stufen und Messung und statistische Auswertung der daraus folgenden Wirkungen. Dabei ist zu beachten, dass jedes Versuchsergebnis mit zufälligen Fehlern, der sog. Versuchsstreuung, behaftet ist als Folge geringer Schwankungen von nicht beeinflussbaren oder unbekanntem Ursachen und von Messfehlern.

Die Folgen der Variation der wenig wirksamen Ursachen können durch die Versuchsstreuung überschattet werden, so dass die Erzielung eindeutiger Resultate in gewissen Fällen mit Schwierigkeiten verbunden oder überhaupt unmöglich ist. Weiter sind die Wirkungen der verschiedenen Ursachen nicht immer additiv. So gibt es z. B. Wechselwirkungen zwischen Wasserdosierung, Luftgehalt, Sandmenge und Staubgehalt, denen nur mit einer sehr grossen Zahl von Versuchen beizukommen ist (Bild 24).

Um einigermaßen brauchbare Resultate zu erhalten, sind bei der Durchführung von Versuchsreihen die einzelnen Ursachen in mindestens vier Stufen zu variieren. Drei oder gar nur zwei Stufen ergeben keine sicheren Resultate. Die Erfüllung dieser Bedingung verlangt eine sehr grosse Anzahl von Versuchen. Sollen z. B. die Wirkungen und Wechselwirkungen von Wasser, Luft, Sand und Staub bestimmt werden, so erfordert eine vollständige Versuchsreihe mit vierstufiger Variation jeder einzelnen Ursache  $4^4 = 256$  Versuche. Die Ergänzung dieser Versuche durch zusätzliche Variation der Zementdosierung und des Mengenverhältnisses zwischen Rundmaterial und Brechmaterial würde die Anzahl der möglichen Versuchskombinationen auf  $4^6 = 4096$  anwachsen lassen. Es ist klar, dass die Durchführung derart

umfangreicher Versuchsreihen für kein Laboratorium tragbar ist, und es kann deshalb nicht verwundern, dass das Gebiet der Betontechnologie noch von vielen Geheimnissen umwoben ist, denen nur sehr schwer beizukommen ist. Für die Anordnung und die statistische Auswertung von Versuchsreihen mit Wirkungen und Wechselwirkungen verschiedener Ursachen leistet das Buch von Prof. Dr. A. Linder «Planen und Auswerten von Versuchen» (Verlag Birkhäuser, Basel) wertvolle Dienste.

Wie bereits in einem früheren Kapitel erwähnt, ist es sinnlos, die Festigkeiten von Probekörpern miteinander zu vergleichen, deren Frischbeton punkto Verarbeitbarkeit und Luftgehalt grosse gegenseitige Unterschiede aufweist. Nun ist aber die Herstellung einer Betonmischung mit genau vorgeschriebenem Luftgehalt und vorgeschriebener Verarbeitbarkeit bei variablem Staubgehalt oder variabler Zementdosierung auch im Laboratorium unmöglich. Dies bedingt, dass bei jeder Versuchsreihe mindestens auch die Wasserdosierung in vier Stufen variiert werden muss, woraus folgt, dass die Abklärung der Wirkung der vierstufigen Variation einer einzelnen Ursache bereits  $4^2 = 16$  Versuche verlangt.

In Bild 15 sind die hauptsächlichsten Ursachen, welche auf die Betonqualität wirken, zusammengestellt. Die Ursachen 1 bis 8, 10, 11, 13 und 14 können im Laboratorium mit geeigneten Mitteln in gewissen Grenzen beliebig variiert oder innerhalb der Versuchsreihen konstant gehalten werden. Die eingeführte Luft (Nr. 12) und die Verarbeitbarkeit (Nr. 9) sind hingegen bereits Wirkungen der zwölf übrigen, beliebig variablen Ursachen, und können, wie bereits erwähnt, auch im Laboratorium nicht genügend genau fabriziert werden. Das nachfolgende Beispiel zeigt, wie diesem Umstand Rechnung getragen werden kann.

2. *Beispiel einer Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses der Zementdosierung auf die Festigkeit von Massenbeton.* Die Versuchsanordnung ist in Bild 15 dargestellt. Die Ursachen 1, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 13 und 14 werden festgehalten, während die Zementdosierung (Nr. 2) und die Wasserdosierung (Nr. 8) in drei bzw. vier Stufen variiert werden.

Tabelle 2. Bestimmung des Einflusses der variablen Verarbeitbarkeit auf die Würfeldruckfestigkeit nach 90 Tagen von Vorsatzbeton PC 250 /  $\phi$  80 mm an Hand der Prüfungsresultate einer Betoniersaison

	3,0 ÷ 3,5		3,5 ÷ 4,0		4,0 ÷ 4,5		4,5 ÷ 5,0		5,0 ÷ 5,5		5,5 ÷ 6,0		6,0 ÷ 6,5		6,5 ÷ 7,0		7,0 ÷ 7,5	
	V	$\beta_0$	V	$\beta_0$	V	$\beta_0$	V	$\beta_0$	V	$\beta_0$	V	$\beta_0$	V	$\beta_0$	V	$\beta_0$	V	$\beta_0$
	2,1	338			4,0	359	4,9	426	5,4	426	5,8	357	6,1	356	6,9	402	7,6	487
	2,9	291			4,2	369	4,7	333	5,4	439	5,5	428	6,2	384	6,7	394	7,6	500
	2,6	314			4,4	404	4,9	355	5,3	411	5,8	437	6,4	368	6,7	359	7,4	511
	2,9	325			4,2	368	4,6	283	5,4	313	5,7	413	6,0	429	6,7	391	7,6	454
	1,0	270					4,8	414	5,3	382	5,9	420	6,3	444	6,6	451	7,1	503
	3,2	384					4,5	390	5,2	407	5,9	443	6,2	461	6,8	468	7,5	493
	2,7	265							5,0	375	5,8	357	6,3	434	6,7	336	7,7	452
									5,3	360			6,3	449	6,5	346	7,1	388
									5,1	451			6,0	408	6,8	388	7,0	473
													6,3	396	6,5	518	7,6	488
													6,4	362	6,5	481	7,3	341
													6,1	364	6,8	429	7,0	424
													6,3	386	6,8	360	7,5	520
													6,0	459	6,9	506	7,7	497
													6,3	432	6,5	368	7,0	505
													6,0	346				
Gesamtmittel			} $V_m = 460,7:79 = 5,85$															
			} $\beta_{0m} = 32018:79 = 408$															
Anzahl	7		4		6		9		7		16		15		468			
$\Sigma$	17,4	2187	16,8	1500	28,4	2201	47,4	3564	40,4	2855	99,2	6478	100,4	6197	110,7	7036		
Mittel	2,5	313	4,2	375	4,7	368	5,3	398	5,8	407	6,2	405	6,8	412	7,4	468		

NR.	URSACHEN :		
1	ZEMENTQUALITÄT	K	UNTERTERZEN
2	ZEMENTDOSIERUNG	V	
3	PETROGRAPHISCHE QUALITÄT DER ZUSCHLAGSTOFFE	K	ALBIGNA
4	KORNFORM	K	AB AUFBEREITUNG ALBIGNA
5	KORNAUFBAU ÜBER 3 mm	K	MAX. KORN 150mm
6	SANDANTEIL 0-3 mm	K	22,5 %
7	STAUB IM SAND 0-3 mm	K	5 %
8	WASSERDOSIERUNG	V	
9	VERARBEITBARKEIT	V	
10	VERARBEITUNGSGRAD	K	90 sec.
11	CHEM ZUSATZMITTEL	K	FRO-BE 0,048‰
12	EINGEFÜHRTE LUFT	V	
13	ALTER	K	28/90 TAGE
14	LAGERBEDINGUNGEN	K	LABOR

DOSIERUNG	PC 100	PC 120	PC 140	PC 160	PC 180
WASSER $\ell/m^3$	103	102	104	104	106
	116	108	114	113	112
	118	116	117	120	120
	123	122			

Bild 15. Schema einer Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses der Variation der Zementdosierung auf die Würfeldruckfestigkeit von Massenbeton mit Maximalkorn  $\phi$  150 mm

In Bild 16 sind die gemessenen Verarbeitbarkeiten, Luftgehalte und Festigkeiten als Funktion der Wasserdosierungen aufgetragen. Die Erfahrung aus zahlreichen, früher durchgeführten Versuchen zeigt, dass die Verarbeitbarkeit ungefähr linear abnimmt mit zunehmender Wasserdosierung. Diese Tatsache erlaubt bereits einen gewissen Ausgleich der Resultate in der Querrichtung (Bild 16), denn sowohl die Neigungen, wie die Höhenlagen der die Verarbeitbarkeit darstellenden Kurven unterliegen gewissen stetigen Veränderungen als Funktion der wechselnden Zementdosierung. Die Schnittpunkte der einer bestimmten Verarbeitbarkeit entsprechenden, horizontalen Geraden mit den Verarbeitbarkeitskurven ergeben die erforderliche Wasserdosierung für jede gewünschte Verarbeitbarkeit (z. B. 114  $\ell/m^3$  für P 160 mit Verarbeitbarkeit 4). Die Festigkeiten werden im gleichen Sinne wie die Verarbeitbarkeit ausgeglichen, womit sich die wahrscheinlichsten Werte derselben für jede gewünschte Verarbeitbarkeit ergeben.

### B. Statistische Auswertung der Prüfungsergebnisse des Betons von Grossbaustellen

Die zuverlässige Kontrolle der Qualität des Betons von Grossbaustellen verlangt mindestens eine Betonprobe pro Tag und Betonsorte. Am Ende jeder Saison sollten daher mindestens 100 Proberesultate zur Verfügung stehen, deren statistische Auswertung eine willkommene Ergänzung der im Laboratorium gefundenen Zusammenhänge liefert. Im folgenden wird eine solche Auswertung an einem Beispiel gezeigt.

Am Frischbeton jeder Probe wurden folgende Messungen durchgeführt: 1. Verarbeitbarkeit, 2. Normenprobe des Zementes, 3. Analyse des Korngemisches: a) Anteile über 3 mm in % sowie deren Sieblinie, b) Anteil Staub < 0,12 mm im Beton, c) Anteil Zement, 4. Luftgehalt in %, 5. Temperatur des Frischbetons. Für die statistische Auswertung wird angenommen, dass die infolge der Variationen der einzelnen Ursachen entstandenen Streuungen symmetrisch um den Mittelwert der Wirkungen verteilt seien. In diesem Falle gelten für die in Tabelle 3 zusammengestellten Ursachen und Wirkungen die folgenden Beziehungen: Wird die Anzahl

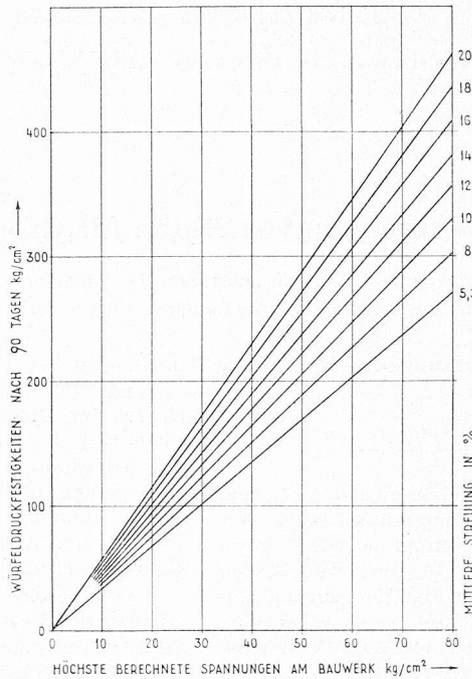


Bild 18. Erforderliche minimale Druckfestigkeit von Betonwürfeln 20/20/20 cm nach 90 Tagen, welche garantiert, dass die Betonfestigkeit bei einer konstanten Spannung am Bauwerk mit einer Wahrscheinlichkeit von  $10^{-7}$  nie erreicht oder unterschreitet

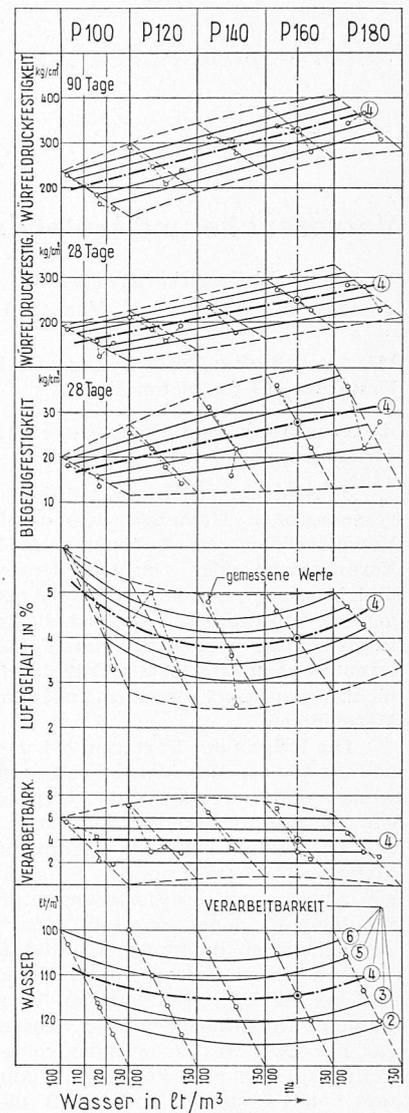


Bild 16 (rechts): Darstellung und Ausgleich der Resultate einer Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses der Variation der Zementdosierung auf die Festigkeit von Massenbeton mit Maximalkorn  $\phi$  150 mm

der Werte einer waagrechten Zeile mit  $N$  bezeichnet, so bedeutet z. B.

$$\beta_{0m} = \frac{\sum \beta_0}{N}$$

das arithmetische Mittel oder den wahrscheinlichsten Wert von  $\beta_0$ .  $\Delta = \beta_0 - \beta_{0m}$  entspricht der Abweichung des Einzelwertes vom Mittelwert, und der Ausdruck

$$\sum \Delta^2 = \sum \beta_0^2 - \frac{(\sum \beta_0)^2}{N}$$

liefert die Summe der Quadrate dieser Abweichungen, während

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum \Delta_0^2}{N-1}}$$

der mittleren Streuung der Werte  $\beta_0$  entspricht.

Um die Wirkung einer Ursache, z. B. der Verarbeitbarkeit des Frischbetons auf die Würfeldruckfestigkeit des Betons nach 90 Tagen ( $\beta_{w,90}$ ) festzustellen, wird der Streubereich dieser Ursache in eine Anzahl Stufen eingeteilt. In Tabelle 2 ist dargestellt, wie die den einzelnen Stufen der Ursachen entsprechenden Wirkungen zusammengefasst und ausgemittelt werden. Bild 17 zeigt das aus etwa 80 Einzelwerten erhaltene Resultat, aus welchem zunächst eine deutliche Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Verarbeitbarkeit hervorgeht.

Mit Hilfe des entsprechenden Diagrammes kann jeder der gemessenen Werte  $\beta_0$  auf die der mittleren Verarbeitbarkeit entsprechende Druckfestigkeit  $\beta_1$  reduziert werden (Tabelle 3 und Bild 17). Damit wird der Einfluss der variablen Verarbeitbarkeit auf die Druckfestigkeit ausgeschaltet.

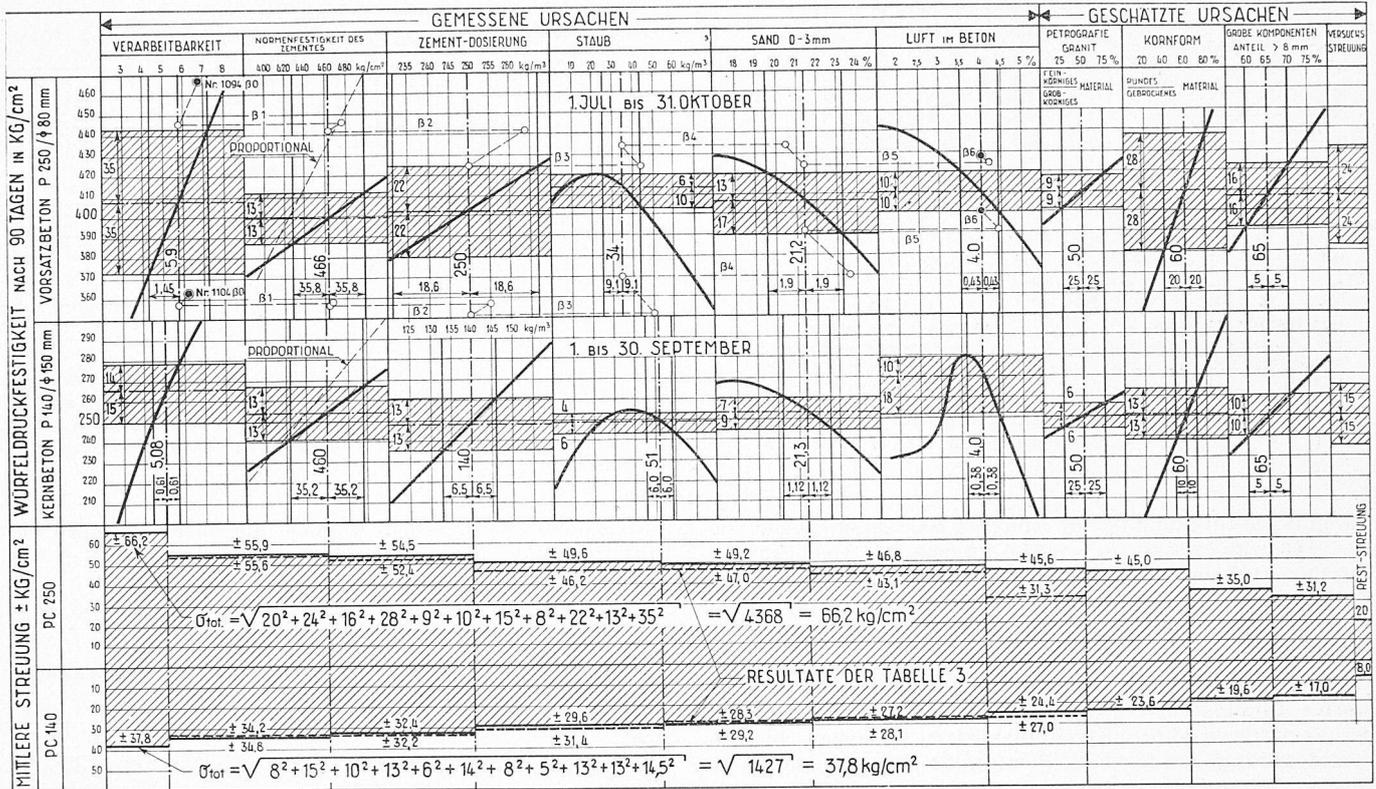


Bild 17. Beispiel der Streuungsanalyse von Probeserien. Oben: Analyse der Streuungen der Würfeldruckfestigkeit von Vorsatzbeton PC 250 / φ 80 mm während der Periode Juli bis Oktober einer Betoniersaison. (80 Resultate, siehe Tabelle Nr. 3). Unten: Streuungsanalyse der Würfeldruckfestigkeit von Kernbeton PC 140 / φ 150 mm während der Periode eines Monats (26 Resultate)

Tabelle 3. Beispiel der statistischen Auswertung der Proberesultate einer Betoniersaison mit fortlaufender Elimination der Einflüsse der Streuungen der einzelnen Ursachen (siehe auch Bild 17.)

$\beta_0$  = Würfeldruckfestigkeit von Beton PC 250 / φ 80 mm nach 90 Tagen.

$$\text{Mittlere Streuung: } \sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum \Delta_0^2}{N-1}}; \quad \sum \Delta_0^2 = \sum \beta_0^2 - \frac{(\sum \beta_0)^2}{N}$$

Probe Nr.		1094	1104	Σ	Mittel ± Streuung	Mass
Datum		11,9	17,9		$\beta_m \pm \sigma$	
Gemessene Würfeldruckfestigkeit	$\beta_0$	468	362	33 447	408 ± 66,2	kg/cm <sup>2</sup>
	$\beta_0^2$	2190	1310	13 999 200		
Verarbeitbarkeit	V	6,8	6,4	485,6	5,9 ± 1,45	
	V <sup>2</sup>	46,2	40,9	3046,3		
	$\beta_1$	446	357	32 988	402 ± 55,6	kg/cm <sup>2</sup>
	$\beta_1^2$	2000	1280	13 521 200		
Zement-Qualität	Q	476	464	38 226	466 ± 35,8	kg/cm <sup>2</sup>
	Q <sup>2</sup>	2265	2153	17 923 300		
	$\beta_2$	442	356	32 788	400 ± 52,4	kg/cm <sup>2</sup>
	$\beta_2^2$	1960	1265	13 333 200		
Zement-Dosierung	C	268	255	20 468	250 ± 18,6	kg/cm <sup>3</sup>
	C <sup>2</sup>	719	650	5 148 000		
	$\beta_3$	424	351	33 054	403 ± 46,2	kg/cm <sup>2</sup>
	$\beta_3^2$	1806	1230	13 496 900		
Staub < 0,12 mm im Beton	P	43	50	2829	34 ± 9,1	kg/cm <sup>3</sup>
	P <sup>2</sup>	1850	2500	104 200		
	$\beta_4$	431	370	33 052	408 ± 47,0	kg/cm <sup>2</sup>
	$\beta_4^2$	1860	1370	13 664 200		
Sand 0—3 mm	S	20,5	23,6	1701,3	21,2 ± 1,9	%
	S <sup>2</sup>	420	557	36 476		
	$\beta_5$	423	391	32 623	407 ± 43,1	kg/cm <sup>2</sup>
	$\beta_5^2$	1790	1525	13 450 200		
Luft	L	4,2	4,4	212,5	4,0 ± 0,43	%
	L <sup>2</sup>	17,6	19,4	878,0		
	$\beta_6$	428	400	21 761	(418 ± 31,3)	kg/cm <sup>2</sup>
	$\beta_6^2$	1830	1600	9 136 600		

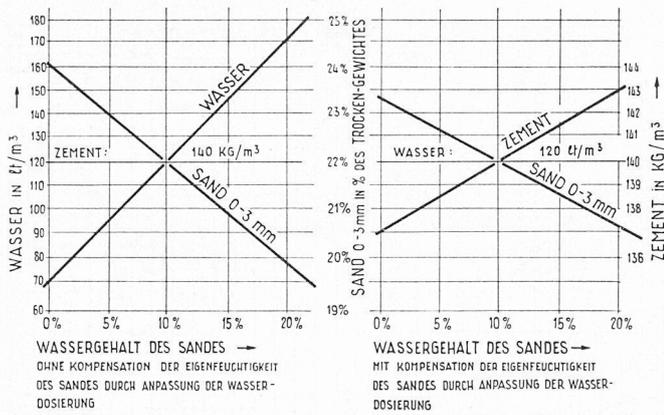


Bild 19. Einfluss der Eigenfeuchtigkeit des Sandes  $0 \div 3$  mm auf die Genauigkeit der Dosierung von Wasser, Sand und Zement

Die mittlere Streuung der  $\beta_1$  reduziert sich entsprechend von  $\sigma_0 = \pm 66,2 \text{ kg/cm}^2$  auf  $\sigma_1 = \pm 55,6 \text{ kg/cm}^2$ . Die vom Einfluss der Variation der Verarbeitbarkeit befreiten  $\beta_1$  können nun als Ausgang zur Bestimmung des Einflusses der Streuung einer anderen Ursache, z. B. der Zementqualität, verwendet werden.

Die Weiterführung des Verfahrens ermöglicht die sukzessive Elimination der Streuungen der Festigkeit infolge der Variationen aller übrigen, messbaren Ursachen, wie Zementdosierung, Staubgehalt, Sandgehalt und Luftabschluss. Das Verfahren ist brauchbar, wenn die mittleren Streuungen der reduzierten Werte  $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_n$  mit steigendem Index abnehmen, wie dies in Tabelle 3 und Bild 17 dargestellt ist.

#### IV. Beurteilung der Sicherheit eines Bauwerkes anhand der Resultate der Betonprüfungen

Einer Veröffentlichung von J. P. Stucky (Sonderdruck vom 15. September 1956 des «Bulletin technique de la Suisse romande») mit dem Titel «Technologie et contrôle des barrages en béton» entnehmen wir folgende Richtlinien: 1. Als Grundlage für die Beurteilung der Bruchsicherheit eines Bauwerkes aus Beton wird verlangt, dass die mittlere Druckfestigkeit von Würfeln  $30/30/30$  cm nach 90 Tagen das 4,2-fache der grössten statischen Beanspruchung des Betons am Bauwerk nicht unterschreiten darf bei einer mittleren Streuung der Proberesultate von  $\pm 14 \%$ . Zur Garantierung einer gleichwertigen Sicherheit bei Probewürfeln  $20/20/20$  cm ist dieser Sicherheitsfaktor um 5 % von 4,2 auf 4,4 zu erhöhen. 2. Als Funktion der Streuung kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit welcher die Festigkeit eines einzelnen Probewürfels auf die berechnete, statische Beanspruchung des Bauwerkes absinken oder diese unterschreiten kann.

Daraus ergibt sich weiter die minimale mittlere Druckfestigkeit der Probewürfel, welche noch garantiert, dass mit der vorgeschriebenen Wahrscheinlichkeit die statisch verlangte Druckfestigkeit nie unterschritten wird. In Bild 18 ist das Resultat dieser Berechnung für die Wahrscheinlichkeit  $1 - p = 10^{-7}$  dargestellt. Der unterste Strahl in Bild 18 entspricht einem Sicherheitsfaktor von 3,4, welcher unabhängig von der Grösse der Streuung in keinem Fall unterschritten werden darf. Tabelle 4 (S. 239) ist aus dem Diagramm Bild 18 abgeleitet und zeigt eindrücklich, welche enorme wirtschaftliche Bedeutung möglichst eng gezogenen Grenzen der Streuung der Betonqualität zukommen kann.

Die Grösse der Streuung wird massgebend beeinflusst durch die extremen Abweichungen der Einzelresultate vom Mittelwert und zwar sowohl durch positive wie durch negative. Einzelne Resultate mit extrem grossen Abweichungen nach oben erhöhen wohl den Mittelwert  $\beta_m$  einer untersuchten Serie, können aber die mittlere Streuung  $\sigma$  derart anwachsen lassen, dass die gemäss dem Diagramm (Bild 18) ermittelte Sicherheit des Bauwerkes sinkt. Ein solches Resultat widerspricht jeder Logik und es ist deshalb zu verantworten, bei der Beurteilung der Sicherheit eines Bauwerkes

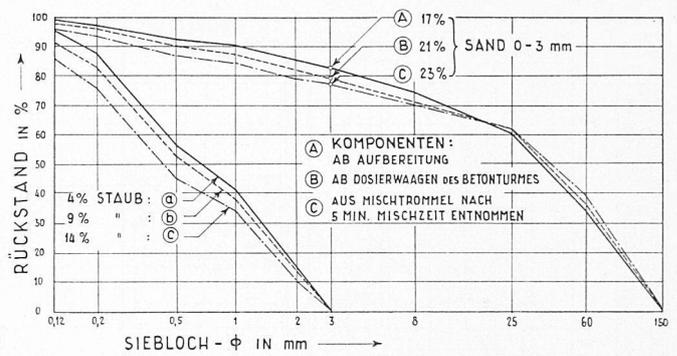


Bild 20. Beispiel für die Staubbildung während dem Transport und dem Mischen der Zuschlagstoffe. Ausiebung von  $3 \text{ m}^3$  Material vor und nach einer Mischzeit von 5 Minuten in einem Koering-Kippmischer. Petrographische Qualität: Schieferiger Gneis

mittels der beschriebenen Methode als oberste Grenze der Einzelresultate

$$\beta_{max} = \beta_m + \sigma$$

zu setzen.

#### V. Streuungen der einzelnen Ursachen und ihrer Wirkungen auf die Druckfestigkeit des Betons

##### A. Arten der Streuungen der Ursachen

1. Streuungen der Qualität der einzelnen Grundstoffe. Den Streuungen der Qualität von Zement, Kies-Sand oder chemischen Zuschlagsstoffen steht der Mann der Baustelle gewöhnlich machtlos gegenüber; er muss diese als gegebene Tatsachen entgegennehmen. Die Qualitätsschwankungen werden oft erst erkannt, wenn die entsprechenden Baumaterialien bereits eingebaut sind. Weiter können die vom Verarbeitungsprozess erfassten Baumaterialien oft nicht mehr ausgeschieden werden, selbst wenn deren Qualität noch vor dem Einbau als zweifelhaft erkannt worden sein sollte.

##### 2. Streuungen der Dosierung

a) Einfluss der Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagsstoffe. Die modernen Dosieranlagen der Betonfabriken mischen die Zuschlagsstoffe automatisch im Verhältnis ihrer festgelegten Gewichte. Die Streuung der Waagen während dem Betrieb ist sehr schwer feststellbar.

Bei der gewichtsmässigen Dosierung macht sich die wechselnde Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagsstoffe, namentlich des Sandes, störend bemerkbar. Aus Bild 19 geht hervor, dass eine variable Eigenfeuchtigkeit des Sandes von  $10 \pm 5 \%$  folgende Streuungen der Dosierung zur Folge haben kann:

Sand $0 \div 3$ mm	$22 \pm 0,7 \%$
Zement	$140 \pm 1,5 \text{ kg/m}^3$
Wasser	$120 \pm 23 \text{ kg/m}^3$

Eine Streuung der Wasserdosierung in dieser Grössenordnung ist absolut unzulässig, und die Wasserbeigabe müsste in diesem Falle laufend der Eigenfeuchtigkeit des Sandes angepasst werden, was aus technischen und menschlichen Gründen nur bis zu einem gewissen Grade möglich ist. Aber selbst wenn dies restlos gelingen sollte, verbleiben immer noch die oben angegebenen Streuungen der Dosierung von Sand und Zement, weil das im Sand enthaltene Wasser als Bestandteil des Sandgewichtes mitgewogen wird. Eine der wesentlichsten Voraussetzungen für eine regelmässige Dosierung ist also die Konstanthaltung der Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagsstoffe, eine Forderung, die in gewissen Fällen nur sehr schwer zu erfüllen ist.

b) Schätzung der Genauigkeit der Dosierung. Die Grössenordnung der Schwankungen der Dosierungen kann anhand der Analyse des Frischbetons abgeschätzt werden (Tabelle 5). Der Frischbeton wird über dem Sieb  $0,12$  mm ausgewaschen. Für die Auswertung wird angenommen, dass die das Sieb durchlaufende Schlämme zusammengesetzt sei aus allem Zement und dem Staub ( $< 0,12$  mm). Gleichzeitig mit der Ausiebung des Betons wird der Sand  $0 \div 3$  mm ab

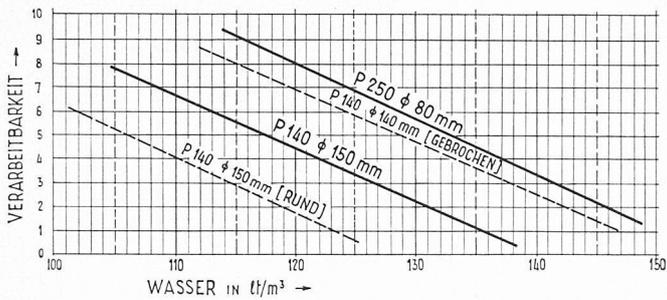


Bild 21. Schema des Zusammenhangs zwischen der Wasserdosierung und der Verarbeitbarkeit von Beton. Anhand der festgestellten Verarbeitbarkeit kann mit diesem Diagramm der effektive Wassergehalt des Frischbetons abgeschätzt werden

Waage im Betonturm analysiert. Der Vergleich zwischen dem Anteil  $< 0,12$  mm im Beton und im Sand ab Waage ergibt eine Differenz, welche sich zusammensetzt aus dem in den groben Komponenten enthaltenen und dem im Mischer durch Abrieb entstandenen Staub sowie einer allfälligen Gewichtsabweichung an Zement infolge ungenauer Dosierung. Erfahrungsgemäss erreicht die Menge des vorerwähnten, zusätzlichen Staubes je nach der Härte des Kieses und der Witterung  $10 \div 40$  kg/m<sup>3</sup>. Auf ungedeckten, im Freien gelagerten Depothaufen der aufbereiteten Kieskomponenten wird bei eintretendem Regen der an den Gesteinsflächen haftende Staub nach unten, gegen die Entnahmeschnauzen gespült, was eine vorübergehende Erhöhung der Feinanteile zur Folge haben kann. Diese unkontrollierbaren Schwankungen verlangen für die Bestimmung des Zementgehaltes eine Analyse der Schlämme  $\leq 0,12$  mm, welche auf einfache Weise möglich ist auf Grund der verschiedenen spezifischen Gewichte von Zement und Gesteinsmehl.

Die Grössenordnung der Bildung von zusätzlichem Staub auf den Transportwegen des Kieses und im Betonmischer ist in Bild 20 dargestellt. Die mit A bezeichnete Siebkurve entspricht einer Mischung der Komponenten im Verhältnis der Einstellung der Waagen der Dosieranlage und in der Qualität, wie die einzelnen Körnungen die Siebe der Aufbereitungsanlage verlassen. Die Kurve B charakterisiert die effektiv im Betonturm ankommende Mischung und C dieselbe Mischung nach einer Mischzeit von 5 min ohne Zementbeigabe. A enthält 17 %, B 21 % und C 23 % Anteile unter 3 mm  $\varnothing$ . Der Staubanteil des Sandes beträgt bei A 4 %, bei B 9 % und bei C gar 14 %.

Die dargestellten Kurven wurden gefunden durch Aussiebung einer Mischung von 3 m<sup>3</sup> Kies-Sand aus relativ weichen und stark schiefrigen Gneisen. Bei kubisch brechendem Granitmaterial ist die Staubbildung während dem Transport der groben Komponenten und dem Mischen kleiner.

Die Grössenordnung des Einflusses der Dosierung von Wasser und Zement auf verschiedene Betonsorten ist in den Bildern 22 und 23 dargestellt.

3. Versuchsstreuungen. Diese dritte Art von Streuungen ist nicht genau messbar und ist eine Funktion der exakten und zuverlässigen Arbeit des Laboratoriums, im besonderen: a) Art der Entnahme der Frischbetonproben. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Zusammensetzung des entnommenen Frischbetons der Granulometrie der ganzen Mischung

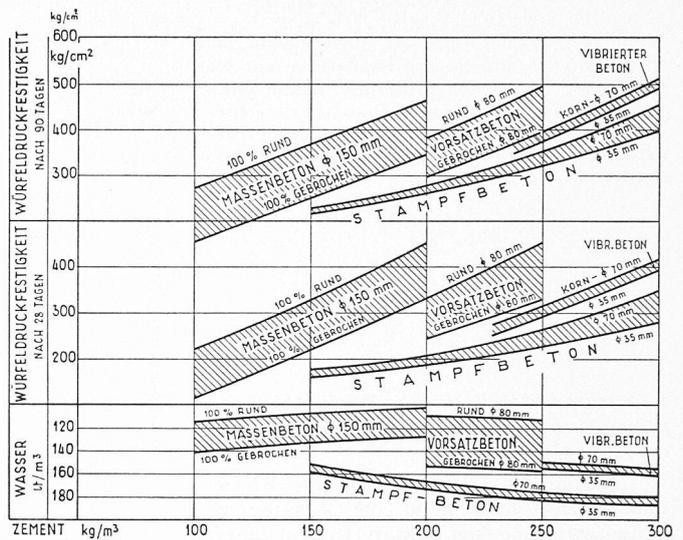


Bild 22. Einfluss der Zementdosierung auf die Würfeldruckfestigkeit von Beton verschiedener Korngrösse, Kornform und Verarbeitung

entspricht. Bei grossen Korndurchmessern verlangt diese Bedingung ein minimales Gewicht der entnommenen Proben (rd. 50 kg beim Korndurchmesser 80  $\div$  150 mm).

- b) Gleiche Verdichtung aller Probekörper (s. Ziff. II/B/2c).
- c) Lagerung der Probekörper bei konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit (15° C und 90 % Luftfeuchtigkeit).
- d) Exakte Einhaltung des Prüfungsalters. Gemäss Bild 27 bedingt ein Altersunterschied von  $\pm 1$  Tag folgende Streuungen der Druckfestigkeit:

nach 7 $\pm$ 1 Tag	$\pm 11$ kg/cm <sup>2</sup>
nach 28 $\pm$ 1 Tag	$\pm 4$ kg/cm <sup>2</sup>
nach 90 $\pm$ 1 Tag	$\pm 1$ kg/cm <sup>2</sup>

- e) Exakte Bearbeitung der Druckflächen der Probekörper (Appretieren mit Spezialmörtel oder Plan-Schleifen).
- f) Konstante, linear ansteigende Geschwindigkeit der Drucksteigerung beim Zerdrücken (rd. 3 kg/cm<sup>2</sup> pro sec).
- g) Abmessungen der Probekörper und Maximal Korn-Durchmesser des zu prüfenden Betons. Gemäss den Bildern 7 und 9 betragen die daraus folgenden Streuungen der Würfel 20/20/20 beim Vorsatzbeton P 250/Ø 80 mm rd.  $\pm 2,5$  % und beim Kernbeton P 140/Ø 150 mm rd.  $\pm 3,5$  Prozent.

4. Reststreuungen. Diese rühren her von den Ungenauigkeiten und Fehlern der Verfahren und von den Wirkungen und Wechselwirkungen unbekannter Ursachen. Sie können im Zuge der Analyse der Streuungen berechnet werden und geben ein Bild von der Genauigkeit der angewendeten Verfahren (siehe Ziff. V/C/11).

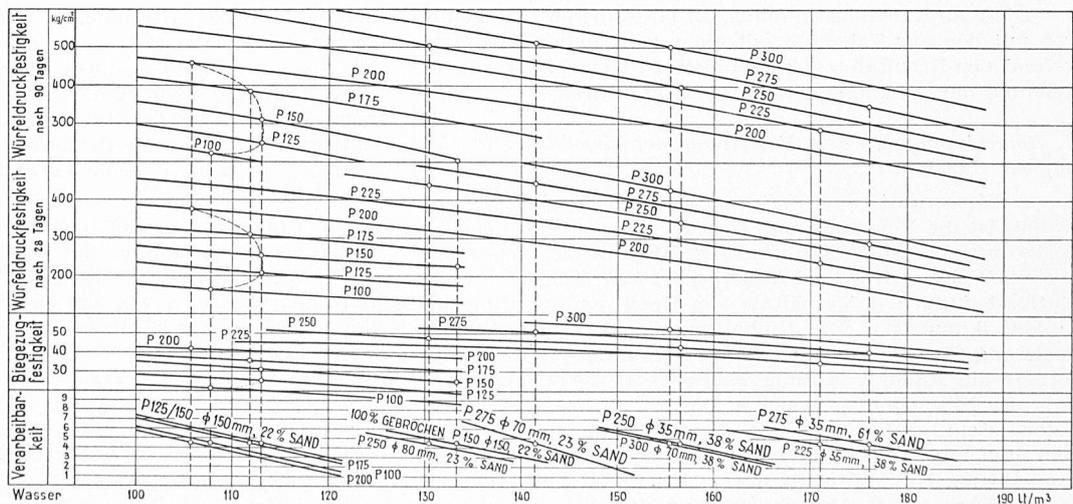


Bild 23. Einfluss der Wasserdosierung auf die Festigkeit und die Verarbeitbarkeit von Beton verschiedener Korngrössen und Kornformen (Granit-Material)

Bild 24. Versuchsreihe zur Untersuchung des Einflusses der Staub- und Sandmenge auf die Festigkeit von Beton P 250 mit Maximalkorn  $\phi$  80 mm, für 100 % rundes und 100 % gebrochenes Material bei einer Verarbeitbarkeit des Frischbetons von  $4,0 \pm 0,5$ . (Ausgeglichene Resultate aus 50 Versuchen)

### B. Zusammenstellung der Wirkungen einzelner Ursachen und deren Streuungen auf der Baustelle

1. *Analyse und Synthese der Streuungen.* In Bild 17 sind die Zusammenhänge zwischen den bekannten und messbaren Ursachen und ihren Wirkungen auf die Würfeldruckfestigkeit nach 90 Tagen zusammengestellt.

Die Kurven der Wirkungen der messbaren Ursachen entsprechen den Ergebnissen der statistischen Auswertung von 90 Prüfungsergebnissen einer Betoniersaison, ergänzt durch die Resultate von im Laboratorium erstellten Versuchsreihen. Die auf der Baustelle am Frischbeton gemessenen bzw. geschätzten Mittelwerte der Ursachen und deren Streuungen, sinngemäss in das in Bild 17 dargestellte Kurvengerippe eingetragen, erlauben eine Prognose für die Druckfestigkeit des Betons und deren Streuung nach 90 Tagen Erhärtung. Umgekehrt ermöglichen die erwähnten Kurven die Analyse der während einer begrenzten Periode festgestellten Streuungen der Druckfestigkeiten des Betons, womit eine solide Grundlage für die Diskussion geeigneter Massnahmen zur Verbesserung der Betonqualität geschaffen wird.

Zwischen der gemessenen Gesamtstreuung  $\sigma_B$  der Würfeldruckfestigkeit und den aus den Variationen der einzelnen Ursachen folgenden Einzelstreuungen  $\sigma_{wn}$  besteht die Beziehung:

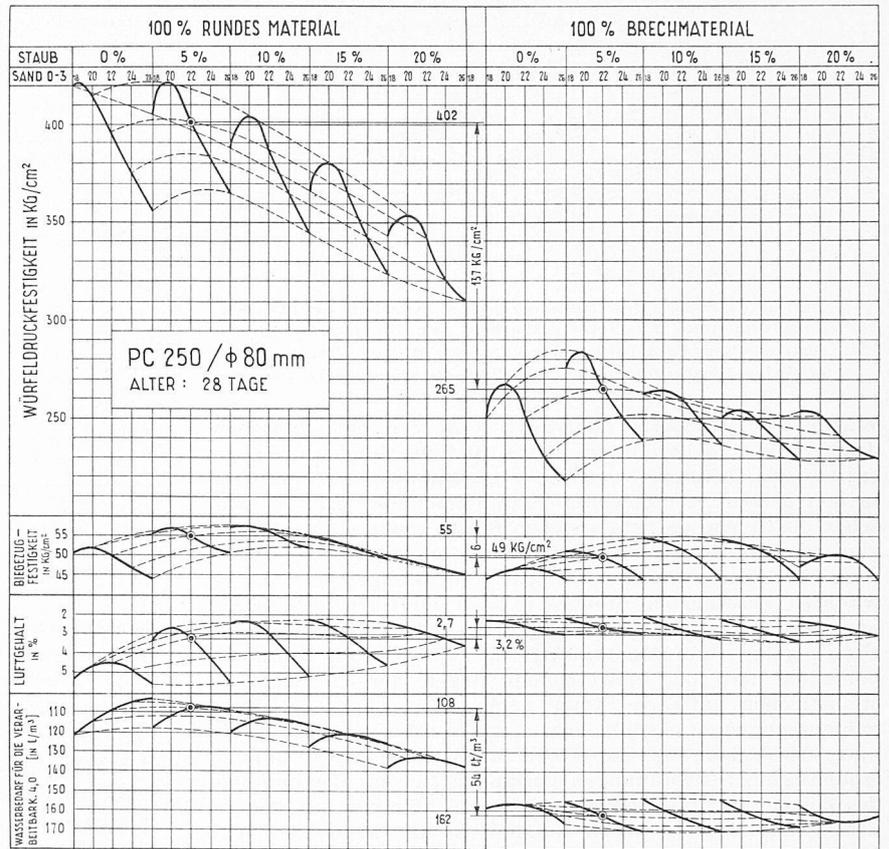
$$\sigma_B = \sqrt{\sigma_{w1}^2 + \sigma_{w2}^2 + \dots + \sigma_{wn}^2}$$

In Bild 17 sind zwei Beispiele einer Analyse der Streuungen und der fortlaufenden Berechnung der Teilstreuungen dargestellt und zwar für die Druckfestigkeiten nach 90 Tagen, von Vorsatzbeton P 250/ $\phi$  80 mm und von Kernbeton P 140/ $\phi$  150 Millimeter. Für den Vorsatzbeton wurde die Gesamtstreuung während einer Betoniersaison analysiert, für den Kernbeton diejenige während eines Monats im Spätsommer.

Die gute Übereinstimmung der berechneten Teilstreuungen mit den aus Tabelle 3 mit einer ganz anderen Methode gefundenen Resultaten lässt Schlüsse zu über die Brauchbarkeit und die Genauigkeit der beiden Verfahren.

### C. Bemerkungen zu den Streuungen der einzelnen Ursachen auf der Baustelle

1. *Wasserdosierung.* Wie bereits im Kapitel V A erwähnt, ist die Voraussetzung für eine regelmässige Wasserdosierung eine konstante Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagstoffe. Weiter wird der Wasserbedarf sehr empfindlich beeinflusst durch das Verhältnis von Brechsand zu Rundsand (Bilder 6 und 24). Die Einhaltung der richtigen Wasserdosierung für eine konstante Verarbeitbarkeit des Betons erfordert die ständige Aufmerksamkeit des Bedienungspersonals der Mischanlage, welches die Konsistenz des Frischbetons stets mit blossem Auge kontrollieren und sofort einschreiten muss, sobald Änderungen sichtbar werden. Ein brauchbares Hilfsmittel ist der in Kapitel II/2 beschriebene Messapparat für die Verarbeitbarkeit, der aber nur wirksam eingesetzt werden kann, wenn er sich in unmittelbarer Nähe des Betonturmes befindet. Bei den auf Albigna vorhandenen



Verhältnissen betrug die Saisonstreuung der Verarbeitbarkeit des Vorsatzbetons  $\pm 1,45$  und die entsprechende monatliche Streuung beim Kernbeton  $\pm 0,61$  (siehe Bild 17). Die daraus resultierenden Streuungen der Druckfestigkeit nach 90 Tagen betragen  $\pm 35$  kg/cm<sup>2</sup> beim Vorsatz- und  $\pm 14,5$  kg/cm<sup>2</sup> beim Kernbeton.

2. *Zementqualität.* Die Staumauer Albigna wurde gleichzeitig von drei Zementfabriken beliefert. Die von der EMPA festgestellten Mittelwerte und Streuungen sind in Tabelle 6 ersichtlich. Gemäss Bild 17 ergibt die statistische Auswertung, dass sich die Betonfestigkeit nicht proportional mit der Normenfestigkeit des Zementes verändert. Die Streuung der Betonfestigkeit infolge variabler Zementqualität beträgt  $\pm 13$  kg/cm<sup>2</sup> beim Vorsatz- und ebensoviel beim Kernbeton.

3. *Zementdosierung.* Die Nachkontrolle der Zementdosierung durch Auswaschung und Ausgiebung des Frischbetons wurde in Kapitel V beschrieben. Bei sehr sorgfältiger Ausführung ergibt das angegebene Verfahren trotz den unvermeidlichen, bereits in der Art der Entnahme des Frischbetons bedingten Streuungen und Messfehlern brauchbare Resultate, welche mit den im Laboratorium ermittelten Werten gut übereinstimmen. Die Streuung der Zementdosierung beträgt  $\pm 18,6$  kg/m<sup>3</sup> beim Vorsatz- und  $\pm 6,5$  kg/m<sup>3</sup> beim Kernbeton. Die Grössenordnung der daraus folgenden mittleren Streuung der Druckfestigkeiten nach 90 Tagen erreicht  $\pm 22$  kg/cm<sup>2</sup> beim Vorsatz- und  $\pm 13$  kg/cm<sup>2</sup> beim Kernbeton.

4. *Staubgehalt.* Die Bestimmung des Staubgehaltes im Beton erfolgt zusammen mit der Nachkontrolle der Zementdosierung (Tabelle 5). Hinsichtlich Genauigkeit des Verfahrens gilt das selbe wie für die Berechnung des Zementgehaltes. Auch hier stimmen die Ergebnisse der statistischen Auswertung mit den Resultaten der im Laboratorium durchgeführten Versuche überein. Den festgestellten Streuungen des Staubgehaltes von  $\pm 9,1$  kg/m<sup>3</sup> im Vorsatzbeton und  $\pm 6,0$  kg/m<sup>3</sup> im Kernbeton entsprechen Streuungen der Druckfestigkeit des Betons nach 90 Tagen von  $\pm 8,0$  kg/cm<sup>2</sup> bzw.  $\pm 5,0$  kg/cm<sup>2</sup>.

5. *Sandgehalt.* Der effektive Gehalt an Sand 0 ÷ 3 mm kann durch die Betonanalyse verhältnismässig genau festgestellt werden. Die Kurven der statistischen Auswertung ver-

laufen ähnlich wie die im Laboratorium gefundenen. Die Streuungen infolge variabler Dosierung des Sandes betragen  $\pm 15 \text{ kg/cm}^2$  beim Vorsatz- und  $\pm 8 \text{ kg/cm}^2$  beim Kernbeton. In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse nicht so einfach. In Bild 24 ist das ausgeglichene Resultat einer Reihe von 50 Einzelversuchen dargestellt, in welcher sowohl die Sandmenge wie die Dosierung des Staubes in je fünf Stufen variiert wurden, und zwar einmal mit 100 % Rundmaterial und ein zweites Mal mit 100 % Brechmaterial. Das Anmachwasser wurde dosiert für eine Verarbeitbarkeit von  $4,0 \pm 0,5$ . Auffallend ist vor allem der grosse Unterschied im Wasserbedarf für rundes und für gebrochenes Material, was sich auf die Würfeldruckfestigkeit entsprechend auswirkt. Die Biegezugfestigkeit wird dadurch nur wenig beeinflusst. Allen Mischungen wurde ein Air-entraining-Mittel zugegeben in genau gleicher Dosierung. Trotzdem variiert der Luftgehalt zwischen 2,0 % und 5,4 %, wodurch die Druckfestigkeit wesentlich beeinflusst wird. Das Beispiel zeigt deutlich, dass dem Problem mit nur 50 Versuchen bei weitem nicht beizukommen ist. Eine zusätzliche Variation des Wassers, der Luft und des Verhältnisses zwischen rundem und gebrochenem Material würde die Anzahl der notwendigen Versuche auf einige 100 ansteigen lassen.

6. *Luftgehalt.* Die Wirkungen der eingeführten Luft auf den fetten Vorsatzbeton P 250 und auf den mageren Kernbeton PC 140 sind gemäss den statistischen Auswertungen sehr verschieden. Der an Zement reiche Beton enthält bereits genügend Schmiermittel. Die Einführung von Luftbläschen bringt keine Verbesserung der Verarbeitbarkeit, die eine spürbare Herabsetzung der Wasserdosierung ermöglichen würde. Die Einführung von Luft hat beim Vorsatzbeton lediglich eine Verbesserung der Frostbeständigkeit und der Wasserdichtigkeit zur Folge. Beim Kernbeton P 140 wird hingegen mit der Einführung von Luft eine wesentliche Verbesserung der Verarbeitbarkeit erzielt. Als Folge der Einsparung an Wasser steigt die Festigkeit bis zu einem Luftgehalt von rd. 3,6 %, um bei weiter steigendem Luftgehalt rapid abzunehmen (Bild 17).

Bild 25 zeigt das Ergebnis einer Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses der eingeführten Luft auf die Druckfestigkeit von Kernbeton PC 150. Für die selbe Verarbeitbarkeit benötigt der 4 % Luft enthaltende Beton pro  $\text{m}^3$  rd. 6 l weniger Wasser als der Beton ohne Lufteinschluss, was eine Erhöhung der Würfeldruckfestigkeit des Betons von  $36 \text{ kg/cm}^2$  nach 28 und von  $40 \text{ kg/cm}^2$  nach 90 Tagen zur Folge hat.

Die statistische Auswertung ergibt gemäss Bild 17 eine Streuung der Betonfestigkeit von  $\pm 10 \text{ kg/cm}^2$  beim Vorsatz- und von  $\pm 14 \text{ kg/cm}^2$  beim Kernbeton, als Folge der Variation des Luftgehaltes um  $\pm 0,43 \%$  bzw.  $\pm 0,38 \%$ . Die entsprechenden Kurven zeigen deutlich, dass bei Verwendung von Air-entraining-Mitteln grösste Sorgfalt für die Einhaltung eines optimalen Luftgehaltes am Platz ist.

7. *Petrographische Qualität des Kies-Sandes.* Im Laufe der Vorversuche wurde ein Festigkeitsunterschied von rd.  $35 \text{ kg/cm}^2$  festgestellt, je nachdem die Zuschlagsstoffe aus grobkörnigem oder feinkörnigem Granit des gleichen Vorkommens bestanden. Gemäss Bild 17 wird die daraus folgende Streuung der Betonfestigkeit auf  $9 \text{ kg/cm}^2$  bzw.  $6 \text{ kg/cm}^2$  geschätzt.

8. *Verhältnis zwischen Rundmaterial und Brechmaterial.* In der in Bild 6 dargestellten Versuchsreihe wird zwischen einem Beton P 150 /  $\varnothing 150 \text{ mm}$  aus 100 % Rundmaterial und einem solchen aus 100 % Brechmaterial ein Unterschied der Würfeldruckfestigkeit nach 90 Tagen von  $119 \text{ kg/cm}^2$  festgestellt. Der Einfluss des Verhältnisses zwischen Rundmaterial und Brechmaterial auf die Druckfestigkeit von P 250 /  $\varnothing 80 \text{ mm}$  geht aus Bild 24 hervor mit  $137 \text{ kg/cm}^2$ . Eine Begrenzung dieses Verhältnisses auf der Baustelle zwischen  $60 \% \pm 20 \%$  hätte gemäss Bild 17 eine Schwankung der Druckfestigkeit des Vorsatzbetons von  $\pm 28 \text{ kg/cm}^2$  zur Folge. Die kleinere Streuung von  $60 \% \pm 10 \%$  im Laufe eines Monats bedingt beim Kernbeton Abweichungen von  $\pm 13 \text{ kg/cm}^2$  vom Mittelwert.

9. *Dosierung der groben Komponenten.* Der Einfluss verschiedener Mischungsverhältnisse der groben Komponenten

auf die Druckfestigkeit des Massenbetons P 150 mit Maximal Korn  $\varnothing 150 \text{ mm}$  geht aus der in Bild 26 dargestellten Versuchsreihe hervor.

Es zeigt sich, dass eine Variation der Komponenten über 40 mm zwischen 35 % und 50 % eine Streuung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen von rd.  $\pm 5 \text{ kg/cm}^2$  zur Folge hat. Die Dosierung der groben Komponenten kann aber auf der Baustelle in viel engeren Grenzen gehalten werden, so dass diese Streuung praktisch ohne Bedeutung ist. Im Gegensatz dazu hat eine Variation des Anteiles unter 8 mm

Tabelle 4. Einfluss der mittleren Streuung der Probe-Resultate auf die Zementdosierung und die Zementkosten einer Staumauer von 1 Mio.  $\text{m}^3$  Beton bei gleichbleibender Sicherheit des Bauwerkes gegen Bruch.

Statische Beanspruchung des Bauwerkes	mittlere Streuung der Probe-Resultate	verlangte mittlere Druckfestigkeit nach 90 Tagen 20/20/20 cm	notwendige Zement-Dosierung	Kosten des Zementes für eine Staumauer von $10^6 \text{ m}^3$ Beton
kg/cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	Mio Fr.
50	10 %	205	120	12
50	15 %	246	140	14
50	20 %	290	170	17
50	25 %	350	200	20

Tabelle 5. Schema zur Berechnung der tatsächlichen Zementdosierung und des Staubgehaltes im Beton aus den Ergebnissen der Analyse des Frischbetons.

Volumen des verdichteten Betons in $\text{dm}^3$	in Probe	im $\text{m}^3$
	20,7	1000
1. Frischbeton komplett	50,00	2410
2. Wasser theoretisch (geschätzt anhand der gemessenen Verarbeitbarkeit gemäss Bild 21)	2,480	120
3. Trockengewicht theoretisch (1—2)	47,520	2290
4. Trockengewicht gewogen		
a) Schlämme $\leq 0,12 \text{ mm}$	3,505	
b) gewaschene Komponenten $0 \div 150 \text{ mm}$	44,320	
c) zusammen*)	47,825	
5. Zementgehalt theoretisch	2,895	140
6. Kies-Sand trocken (4c—5)	44,930	2150
7. Staub $\leq 0,12 \text{ mm}$ in 4 b	0,244	
8. total Anteil $\leq 0,12 \text{ mm}$ (4 a + 7)	3,749	
9. Zementgehalt in 8 gemäss Analyse der Schlämme (82 % vom 8)	3,075	148
10. Staub $\leq 0,12 \text{ mm}$ (8—9)	0,647	32,5
11. Sand $0,12 \div 3,0 \text{ mm}$ aus Aussiebung 20,0 % von 6	8,850	430
12. Staub $\leq 0,12 \text{ mm}$ im Sand ab Waage des Betonturmes gem. Analyse (5,5 % von 11)	0,486	23,6
13. Zusätzlicher Staut (10—12)	0,188	8,9

\*) Der Vergleich mit Ziffer 3 gestattet eine Kontrolle des angenommenen Wassergehaltes sobald das Raumgewicht des erhärteten Betons bekannt ist.

Tabelle 6. Von der EMPA festgestellte Mittelwerte und Streuungen der Normenfestigkeiten des Zementes von drei Fabriken, welche gleichzeitig eine Staumauer-Baustelle beliefern (in  $\text{kg/cm}^2$ ).

Monat	Fabrik 1		Fabrik 2		Fabrik 3		Gesamt	
	Mittel	Streu- ung	Mittel	Streu- ung	Mittel	Streu- ung	Mittel	Streu- ung
	kg/cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>2</sup>		kg/cm <sup>2</sup>	
Juni	537	$\pm 25,8$	574	$\pm 4,5$	524	$\pm 40,7$	532	$\pm 31,8$
Juli	547	$\pm 15,9$	574	$\pm 4,5$	557	$\pm 12,7$	555	$\pm 16,4$
August	508	$\pm 20,9$	583	$\pm 42,5$	552	$\pm 24,0$	557	$\pm 41,2$
Sept.	553	$\pm 25,4$	589	$\pm 51,5$	563	$\pm 18,0$	566	$\pm 34,2$
Oktober	563	$\pm 48,3$	570	$\pm 24,5$	565	$\pm 11,7$	565	$\pm 37,3$
Saison	546	$\pm 32,6$	582	$\pm 38,7$	553	$\pm 26,6$	556	$\pm 33,7$

Ø zwischen 27 % und 35 % eine maximale Streuung der Betonfestigkeit von rd. ± 15 kg/cm<sup>2</sup> zur Folge. Der auf der Baustelle auftretenden Variation der Komponenten über 8 mm zwischen 65 % ± 5 % entsprechen Streuungen der Druckfestigkeit nach 90 Tagen von ± 16 kg/cm<sup>2</sup> beim Vorsatz- und ± 10 kg/cm<sup>2</sup> beim Kernbeton.

10. *Versuchsstreuungen.* Diese werden geschätzt mit ± 6 % und betragen beim Vorsatzbeton ± 24 kg/cm<sup>2</sup> und beim Kernbeton ± 15 kg/cm<sup>2</sup>.

11. *Reststreuungen.* Gemäss der in Ziff. V/B angegebenen Beziehung gilt für die Reststreuung:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_B^2 - \sum_{i=1}^{10} \sigma_n^2}$$

$\sigma_B$  entspricht der effektiv festgestellten Streuung der Würfeldruckfestigkeit des Betons, während die  $\sigma_n$  den unter Ziffern 1 bis 10 besprochenen Einzelstreuungen entsprechen. Für die in Bild 17 dargestellten Beispiele berechnen sich die Reststreuungen wie folgt:

für den Vorsatzbeton (Saisonmittel):

mittlere Druckfestigkeit:  $\beta_{om} = 408 \pm 66,2$  kg/cm<sup>2</sup>

mittlere Streuung:  $\varepsilon = 16,2$  %

$$\sigma_R = \sqrt{66,2^2 - 3954} = \sqrt{438} = \pm 21 \text{ kg/cm}^2 \quad \varepsilon_R = 5,1 \%$$

für den Kernbeton (Monatsmittel):

mittlere Druckfestigkeit:  $\beta_{om} = 256 \pm 37,8$  kg/cm<sup>2</sup>

$\varepsilon = \pm 14,8$  %

$$\sigma_R = \sqrt{37,8^2 - 1365} = \sqrt{64} = \pm 8 \text{ kg/cm}^2, \quad \varepsilon_R = \pm 3,1 \%$$

Sowohl die Gesamtstreuung als auch die Reststreuung während der Periode eines Monats sind bedeutend kleiner als die entsprechenden Streuungen während einer ganzen Saison. Der Grund dafür liegt in den viel grösseren Temperaturunterschieden während einer ganzen Saison, sowie in den grösseren, vom Baggerfeld herrührenden Unregelmässigkeiten während einer längeren Zeitspanne (z. B. petrographische Qualität sowie Verhältnis von Brechmaterial zu Rundmaterial). Weiter macht sich die Tendenz, bei kaltem Wetter am Anfang und am Ende der Betoniersaison die Zementdosierung etwas zu erhöhen, deutlich bemerkbar in der Grösse der Saisonstreuungen.

#### D. Teilstreuungen und Gesamtstreuung

Von den in Bild 17 dargestellten Streuungen der Ursachen ist eine Anzahl messbar, während die übrigen nur geschätzt werden können. Ein Teil der Ursachen ist auf der Baustelle mit geeigneten Mitteln beeinflussbar, ein anderer Teil muss als gegeben hingenommen werden. Dazu gehören: Zementqualität, petrographische Qualität, Verhältnis Brechmaterial : Rundmaterial, Versuchsstreuung und Reststreuung.

Die daraus berechnete, unbeeinflussbare Teilstreuung beträgt:

$$\begin{aligned} \sigma_{aV} &= \sqrt{13^2 + 9^2 + 28^2 + 24^2 + 21^2} = \\ &= \sqrt{2051} = \pm 45 \text{ kg/cm}^2 = \pm 11,0 \% \end{aligned}$$

für den Vorsatzbeton und

$$\begin{aligned} \sigma_{aK} &= \sqrt{13^2 + 6^2 + 13^2 + 15^2 + 8^2} = \\ &= \sqrt{663} = \pm 25,8 \text{ kg/cm}^2 = \pm 10,1 \% \end{aligned}$$

für den Kernbeton.

Nimmt man an, dass die Streuungen infolge der Variationen des Staubgehaltes, der Sanddosierung und der Mengenverhältnisse der groben Komponenten nicht weiter reduziert werden können, so steigt die Minimalstreuung beim Vorsatzbeton auf:

$$\begin{aligned} \sigma_{bV} &= \sqrt{2051 + 8^2 + 15^2 + 16^2} = \\ &= \sqrt{2596} = \pm 51,0 \text{ kg/cm}^2 = \pm 12,5 \% \end{aligned}$$

und beim Kernbeton auf:

$$\begin{aligned} \sigma_{bK} &= \sqrt{663 + 5^2 + 8^2 + 10^2} = \\ &= \sqrt{852} = \pm 29,2 \text{ kg/cm}^2 = \pm 11,4 \% \end{aligned}$$

Die gesamte Differenz zwischen dieser Minimalstreuung und der Gesamtstreuung stammt von der ungenauen Dosierung von Wasser, Zement und Luft, welche sich wie folgt auswirken:

beim Vorsatzbeton:

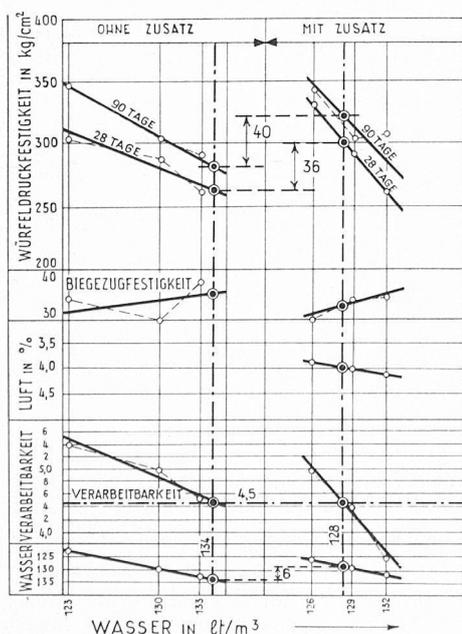


Bild 25. Versuchsreihe zur Feststellung der Wirkung eines Lufteinschluss-Mittels auf die Verarbeitbarkeit und die Würfeldruckfestigkeit von Kernbeton P 150 /  $\phi$  150 mm

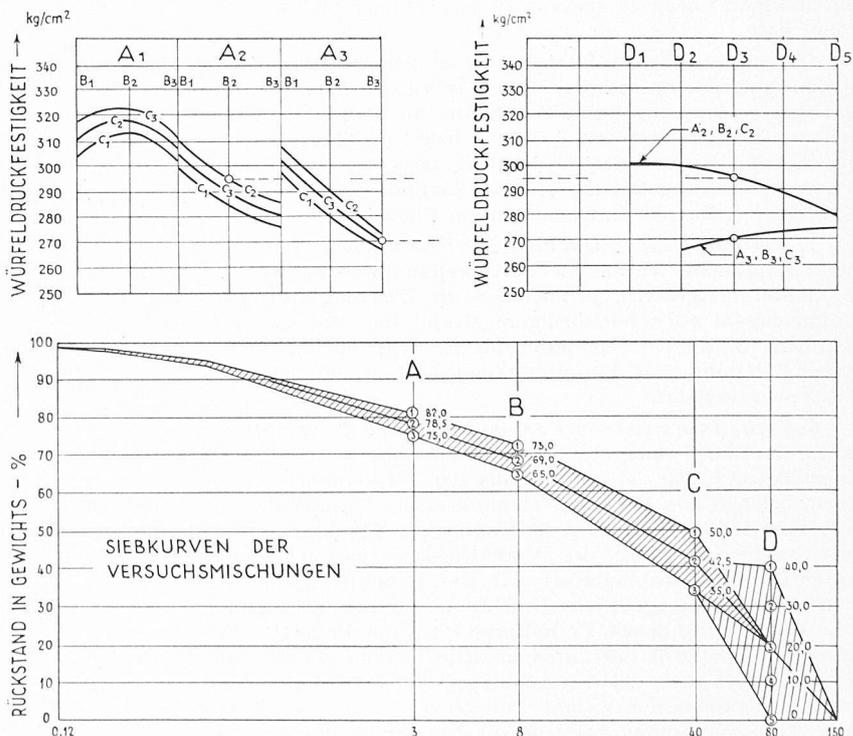


Bild 26. Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses der Variation der Dosierung der grösseren Komponenten auf die Druckfestigkeit von Beton P 150 mit Maximal Korn  $\phi$  150 mm

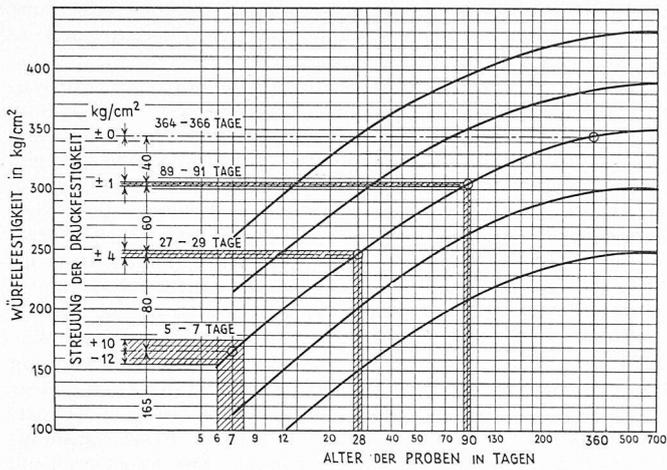


Bild 27. Darstellung des Einflusses des Alters der Probekörper auf die Versuchs-Streuung

$$\sigma_{cV} = \sqrt{2596 + 35^2 + 22^2 + 10^2} = \sqrt{4405} = \pm 66,4 \text{ kg/cm}^2 = \pm 16,2 \%$$

und beim Kernbeton:

$$\sigma_{cK} = \sqrt{852 + 14,5^2 + 13,0^2 + 14,0^2} = \sqrt{1449} = 38,2 \text{ kg/cm}^2 = \pm 14,8 \%$$

Der magere Kernbeton ist wesentlich empfindlicher auf Schwankungen der Dosierungen als der fettere Vorsatzbeton.

#### E. Massnahmen zur Verminderung der Streuungen

Die Analyse der Streuungen zeigt deutlich, wo angesetzt werden müsste, falls eine Herabsetzung der festgestellten Gesamtstreuung notwendig würde. Auf der Installationsseite müssten Massnahmen getroffen werden, welche eine konstante Eigenfeuchtigkeit des Kies-Sandes, sowie ein kon-

stantes Gewichtsverhältnis zwischen Rundsand und Brechsand gewährleisten. Dies verlangt getrennte Aufbereitungsanlagen und Siloräume für Rundsand und Brechsand, also eine sehr kostspielige Massnahme, deren Wirtschaftlichkeit sorgfältig zu prüfen wäre. Eine mindestens ebenso grosse Verminderung der Streuung könnte eine verschärfte Kontrolle der Betonaufbereitung bringen, mit täglich mehrmaligen Messungen der Verarbeitbarkeit und des Luftgehaltes, sowie mehreren Analysen des Korngemisches, welche die Aenderungen im Zement- und Staubgehalt sofort zu erkennen und zu korrigieren ermöglichen. Eine möglichst lückenlose Kontrolle der Betonaufbereitung mit genügendem und zuverlässigem Personal wird trotz modernsten Maschinen und besten chemischen Zusatzmitteln stets das zuverlässigste und wirtschaftlichste Mittel bleiben, um einen qualitativ hochwertigen Beton herzustellen. Alle Erkenntnisse und Hilfsmittel von Wissenschaft und Technik versagen, wenn es an geeignetem Personal fehlt, das mit den notwendigen Kenntnissen und Hilfsmitteln ausgerüstet, in der Lage sein sollte, auf der Baustelle die oft unbequemen Forderungen der Betontechnologie bis zur letzten Konsequenz zu verwirklichen.

#### F. Am Bauwerk festgestellte Streuungen der Betonqualität

Die Entnahme von Bohrkernen mit mindestens 20 cm Ø gestattet die Kontrolle der Qualität des im Bauwerk eingebrachten Betons (Bild 28). Die Erfahrung zeigt, dass die auf diese Weise entnommenen Probekörper im allgemeinen eine etwas höhere mittlere Festigkeit aufweisen als die aus dem Frischbeton der selben Etappe im Laboratorium hergestellten Probekörper. Dies kann damit erklärt werden, dass durch die heute gebräuchlichen, sehr starken Vibratoren ein Teil des Anmachwassers ausgetrieben wird, was zweifellos zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit führen muss. Weiter findet das Abbinden des Betons im Innern grosser Massen unter ganz anderen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen statt als die Erhärtung von Probewürfeln im Laboratorium.

Die Streuungen der Festigkeiten der dem Bauwerk entnommenen Proben sind im allgemeinen grösser als diejenigen

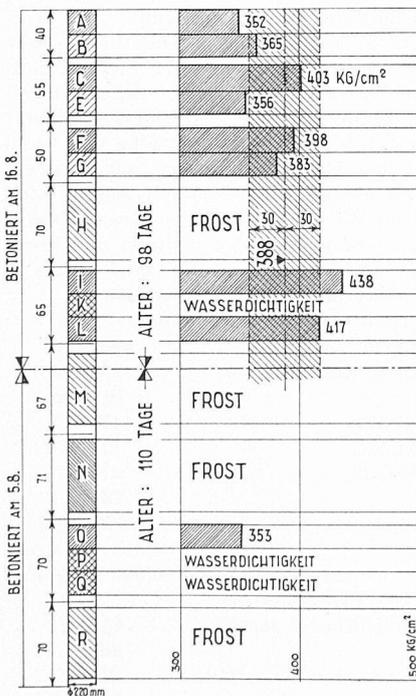


Bild 28. Bohrkern  $\phi$  22 cm, dem Vorsatzbeton P 250 /  $\phi$  80 mm entnommen. Der Mittelwert der Druckfestigkeit einer Tagesetappe beträgt  $388 \pm 30 \text{ kg/cm}^2$  im Alter von 98 Tagen

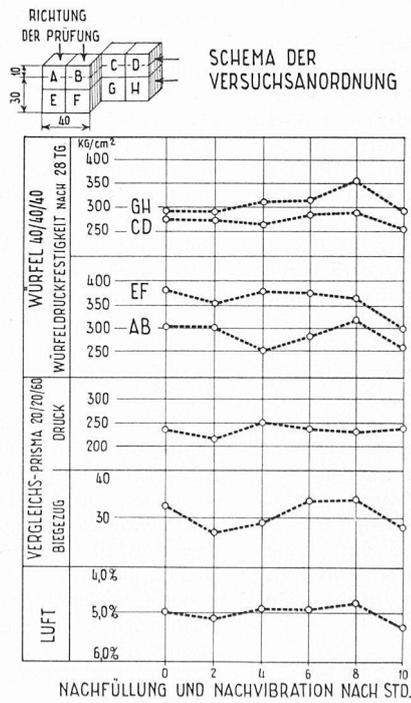


Bild 29. Versuchsreihe zur Feststellung des Einflusses der Nachvibration auf die Festigkeit des Betons. Die Formen 40/40/40 cm wurden vorerst bis auf 30 cm Höhe mit Frischbeton gefüllt und vibriert. Die Einfüllung und die Vibration der obersten 10 cm erfolgte 2, 4, 6, 8 und 10 Stunden später. Dabei wurde der Nadelvibrator bis auf den Boden der Form durchgedrückt

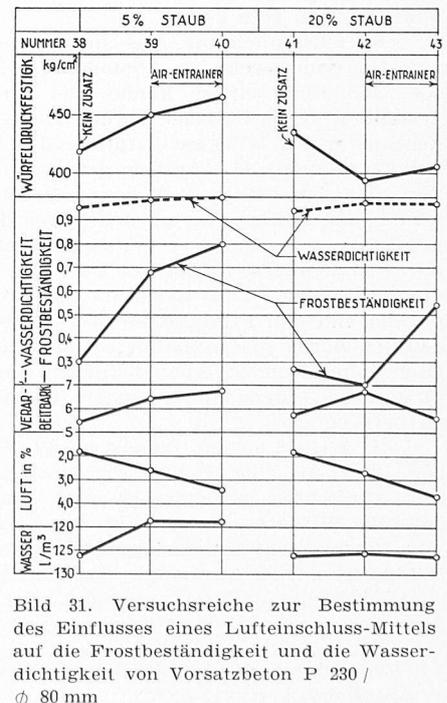


Bild 31. Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses eines Lufteinschluss-Mittels auf die Frostbeständigkeit und die Wasserdichtigkeit von Vorsatzbeton P 230 /  $\phi$  80 mm

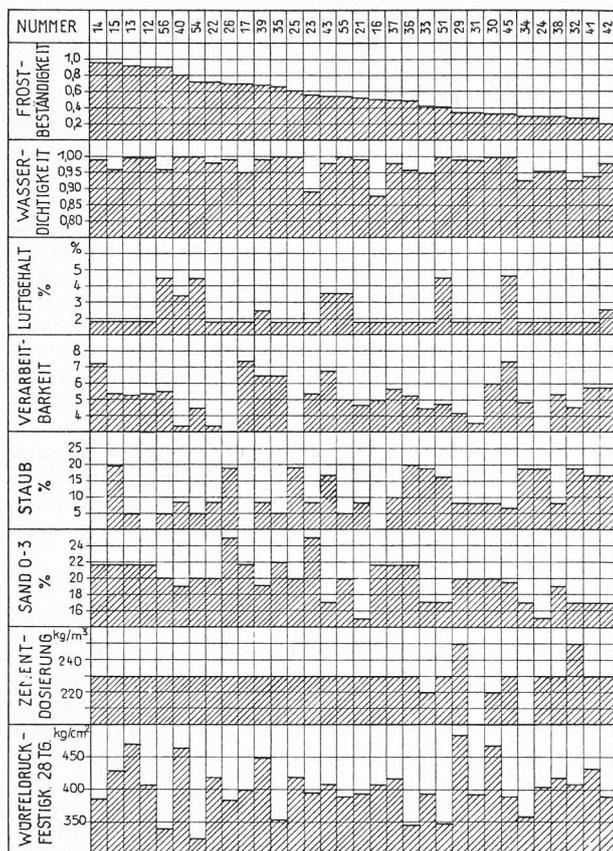


Bild 30. Zusammenstellung von Resultaten der Prüfungen auf Frostbeständigkeit und auf Wasserdichtigkeit. (Masseinheiten siehe Kapitel II / B)

der im Laboratorium hergestellten Vergleichskörper. Dieser Umstand erklärt sich mit einer gewissen Entmischung beim Einbringen und bei der Verdichtung. Innerhalb der etwa 60 cm hohen Frischbetonschichten findet beim Vibrationsvorgang eine ähnliche Entmischung statt, wie diese innerhalb der Probewürfel 40/40/40 cm konstatiert wurde (siehe Kapitel II/3 und Bild 9).

Oft wird auch die Ansicht vertreten, dass die Nachvibration von bereits im Abbindeprozess befindlichem Beton sehr schädlich wirken könne. Bei der in Bild 29 dargestellten Versuchsreihe wurden die Probewürfel 40/40/40 Zentimeter auf je 30 cm gefüllt und mit der Nadel vibriert. Die Einfüllung und Vibration der obersten 10 cm erfolgte in Zeitabständen von 2, 4, 6, 8 und 10 Stunden. Dabei wurde jeweils der Vibrator bis an den Boden der Eisenform durchgedrückt, so dass der vorher eingebrachte, teilweise bereits im Abbindeprozess befindliche Beton nochmals tüchtig durchvibriert wurde. Die Resultate der Abpressungen laufen parallel mit den Festigkeiten der Vergleichsprismen, welche deutlich durch die eingeführte Luft beeinflusst sind. Selbst nach zehn Stunden Abbindezeit ist somit keine Beschädigung des Gefüges infolge einer Nachvibration des Betons zu befürchten.

Als Kriterium für die maximale Zeit, welche verstreichen darf, bis eine weitere Frischbetonschicht auf eine bereits verdichtete aufgebracht wird, muss verlangt werden, dass die Vibratoren noch auf ihrer ganzen Länge in die alte Betonschicht einzudringen vermögen. Beim Einbau des Betons ist darauf zu achten, dass die Vibratoren durch die obere Schicht hindurch möglichst tief in die untere eindringen.

#### VI. Beobachtungen über die Frostbeständigkeit und die Wasserdichtigkeit

In Bild 30 sind 32 Versuchsergebnisse in der Reihenfolge der Grösse ihrer Frostbeständigkeit zusammengestellt (Mass für Frostbeständigkeit und Wasserdichtigkeit siehe Kapitel II/B/3). Parallel dazu sind die entsprechenden Wasserdichtigkeiten, Luftgehalte (sofern Air-entraining-Mittel

verwendet wurden), Verarbeitbarkeiten, Staub-, Sand- und Zementgehalte, sowie die Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen aufgetragen.

Die Frostbeständigkeit scheint abzunehmen mit steigendem Staubgehalt und sinkendem Sandgehalt. Weiter sind die frostempfindlichen Proben weniger wasserdicht als die frostbeständigen. Der umgekehrte Schluss kann dagegen nicht gezogen werden: Die Wasserdichtigkeit der Proben Nr. 51, 30, 45 und 42 ist ausgezeichnet, während die Frostbeständigkeit als schlecht zu bezeichnen ist. Bei den Proben Nr. 56, 54, 51 und 45 ist deutlich zu erkennen, dass infolge der Einführung von Luft die Druckfestigkeit sinkt, während sich vor allem die Wasserdichtigkeit verbessert. Die Probekörper Nr. 12, 13, 14 und 15 wurde ohne Air-entraining-Mittel ausgeführt zum Zwecke der Feststellung des Einflusses von Staub auf die Frostbeständigkeit. Diese Probekörper hielten praktisch ohne Beschädigung 500 Frostwechsel aus, während diejenigen mit einer Frostbeständigkeit von weniger als 0,6 bereits nach 150 Frostwechseln deutliche Spuren der Zerstörung aufweisen.

Wovon schliesslich eine gute Frostbeständigkeit abhängig ist, konnte im Laufe unserer Versuche nicht einwandfrei abgeklärt werden. Es ist möglich, dass dabei die Qualität des Zementes eine wesentliche Rolle spielt, wie dies Ing. Orth in einer ausführlichen Arbeit nachgewiesen hat («Schweizer Archiv» 1957, Heft 6—7).

In welchem Masse die eingeführte Luft auf die Frostbeständigkeit wirken kann, zeigt Bild 31. Es geht daraus hervor, dass die Beimischung eines Air-entrainers nutzlos ist, wenn damit nicht mindestens ein Luftporeneinschluss von 3,0 % erreicht wird.

Adresse des Verfassers: H. Bertschinger, dipl. Ing., Vicosoprano (Graubünden).

## Vom Kernkraftwerk Hinkley Point

DK 621.039

Ueber dieses grösste Kernkraftwerk, das sich gegenwärtig in England im Bau befindet, sind anlässlich der Genfer Konferenz über die friedliche Ausnützung der Atomenergie interessante Einzelheiten bekanntgegeben worden, die in «The Engineer» vom 17. Oktober 1958 veröffentlicht wurden. Sie ergänzen die im Aufsatz von A. Kroms in SBZ 1958, Heft 35, S. 507 enthaltenen Ausführungen.

Um die Bauarbeiten zu beschleunigen und die grossen Apparaturen, vor allem die Druckkessel der beiden Reaktoren sowie die grossen Wärmeaustauscher in zweckmässiger Weise aufbauen zu können, wurde ein Portalkran mit einer Spannweite von rd. 76 m, einer lichten Höhe von 64 m und einer Hubkraft an den Haupthaken von 400 t aufgestellt. Die Apparate und die entsprechenden Gebäude sind so angeordnet, dass sie im Wirkungsbereich dieses Krans liegen. Jedes der beiden Reaktorgebäude ist 53,4 m hoch und überdeckt eine rechteckige Grundfläche von 105 × 56,4 m. Jedes ist mit einem Laufkran von 150 t Tragkraft versehen.

Die Hauptdaten werden wie folgt angegeben:

Wärmeleistung pro Reaktor	966 MW
Durchmesser des Druckbehälters (Kugel)	20,6 m
Wandstärke	76 mm
Höchste Spaltstofftemperatur	430° C
Kühlgas-Eintrittstemperatur	179° C
Kühlgas-Austrittstemperatur	373° C
Gasdruck am Eintritt	13 atü
Umgewälztes Gasgewicht	4670 kg/s
Druckabfall im Reaktor	0,313 kg/cm <sup>2</sup>
Druckabfall im ganzen Kreislauf	0,606 kg/cm <sup>2</sup>
Anzahl Wärmeaustauscher pro Reaktor	6
Dampfdruck bei HD-Ueberhitzer-Austritt	45 atü
Temperatur	363° C
Dampfdruck bei ND-Ueberhitzer-Austritt	12 atü
Temperatur	349° C
Hochdruck-Dampfmenge pro Reaktor	800 t/h
Niederdruck-Dampfmenge pro Reaktor	453 t/h
Anzahl Hauptturbinen	6
Nennleistung pro Turbine	87 MW
Anzahl der Hilfsturbinen	3