

# Bauwerkfestigkeit: Untersuchungen auf der Baustelle Kernkraftwerk Leibstadt

Autor(en): **Geistlich, Karl / Ghielmetti, Marco**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 44

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74237>

## **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.

### Vorwort zum ASIC-Heft

L'Association suisse des ingénieurs-conseils (ASIC) présente dans ce numéro, trois articles de ses membres. Ils sont l'expression des orientations que l'ingénieur peut envisager: l'ingénieurs et la pratique, l'ingénieur et la théorie.

L'ingénieur-conseil n'est un bon praticien que si son expérience s'appuie sur une science sûrement élaborée et réciproquement, le scientifique a besoin des appels de la pratique pour orienter sa recherche. C'est pour-

quoi l'ASIC est prête à toute collaboration, notamment avec les Ecoles polytechniques fédérales et estime qu'il faut, qu'entre nos institutions, le courant d'échange passe davantage. Ne pourrait-on pas prendre prétexte du 125e anniversaire de la fondation de l'EPFZ pour nous ouvrir plus que par le passé, par exemple, par des colloques, des publications, des mises à disposition de logiciel, etc.?

Enfin, l'ingénieur-conseil ASIC se veut éga-

lement être un patron d'avant-garde qui considère que l'équipe de travail doit pouvoir évoluer dans une ambiance sereine et détendue, propice au travail de conception et d'étude, ce que notre association a réalisé avec la FSAI en introduisant un contrat collectif de travail pour ses employés, mais ouvert à tous les autres bureaux également.

B. Clément, Fribourg  
Président de l'ASIC

## Bauwerkfestigkeit

### Untersuchungen auf der Baustelle Kernkraftwerk Leibstadt

Von Karl Geistlich und Marco Ghielmetti, Zürich

Trotz umfangreichem Bauvorhaben (110000 m<sup>3</sup> Beton in 42 Monaten) mit intensiver Überwachung und zahlreichen Versuchen kann nur ein kleiner Teil der Fragen, die sich bei der Betongütebeurteilung eines Bauwerks stellen, beantwortet werden. In Übereinstimmung mit andern Untersuchungen ist festzuhalten: Die Bohrkerndruckfestigkeit ist im allgemeinen geringer als die Würfeldruckfestigkeit; die Festigkeitsstreuung fällt im Bauwerk höher aus; die Rohdichte des Bauwerkbetons liegt signifikant unter der Würfelrohddichte; hohe Bauteile sind anfällig für Festigkeitseinbussen in den obersten Bereichen. Offen bleibt die Frage, ob die geringere Festigkeit des Bauwerks vorwiegend auf «naturegegebene» Umstände oder eher auf «traditionelle» Mängel in der Bauausführung (Einbringen, Verdichten, Nachbehandeln) zurückzuführen ist. Die Bohrkerndruckfestigkeit als Mass für Herstellung und Verarbeitung des Betons sollte neben der Würfeldruckfestigkeit vermehrt Bedeutung bei der Qualitätsbeurteilung von Bauwerken gewinnen.

Wie kann die Betonqualität eines Bauwerkes auf einfache, aber trotzdem zuverlässige Art bestimmt werden? Messbare Grössen, die bestimmte Aspekte der Betongüte beleuchten, sind u. a. die Rohdichte, der Wasserzementfaktor, die Festigkeit und ihre Verteilung im gesamten Bauwerk. Seit langem hat sich die Betonfestigkeit – genauer die Druckfestigkeit unter einaxialer Belastung – als wichtigstes Kriterium eingebürgert.

Im folgenden ist zwischen den zwei Begriffen «Frischbetonherstellung» und «Verarbeitung» zu unterscheiden. Die eigentliche Betonherstellung umfasst Auswahl, Dosierung und Mischen der Komponenten. Unter Verarbeitung verstehen wir das Einbringen, Verdichten und Nachbehandeln des Betons.

Die übliche an separat hergestellten Betonwürfeln ermittelte Druckfestigkeit erfasst nur den Bereich der Frischbetonherstellung, da die streng genormten Verarbeitungsbedingungen mit den Verhältnissen auf der Baustelle in der Regel nicht übereinstimmen. Rückschlüsse von Würfelversuchen auf die

effektive Festigkeit im Bauwerk sind deshalb mit grossen Unsicherheiten behaftet. Die Bauwerkfestigkeit selbst kann lokal mit Hilfe von aus dem Bauwerk herausgearbeiteten Proben bestimmt werden. Diese Prüflinge (im allgemeinen Bohrkerne) ermöglichen Aussagen über Herstellung und Verarbeitung des Betons. Beim Vergleich der beiden erwähnten Festigkeiten ergeben sich Differenzen, deren Ursachen wegen der Vielzahl mitwirkender Faktoren (Herstellung, Verarbeitung, Lagerung, Prüfung) noch nicht genügend erforscht worden sind.

Zu diesem Thema sei hier eine Untersuchung der Baustelle Kernkraftwerk Leibstadt vorgestellt. Die qualitätskonforme Ausführung dieses hinsichtlich Sicherheit hohe Anforderungen stellenden Bauwerkes verlangt einen grossen Überwachungsaufwand. Neben vielen anderen Versuchen sind auf dieser Grossbaustelle bis heute einige hundert Druckfestigkeitsprüfungen mit separat gefertigten Betonwürfeln und dem Bauwerk entnommenen Prüflingen durch-

geführt worden. Durch diese Prüfungen konnte nachgewiesen werden, dass der Beton die an ihn gestellten Anforderungen erfüllt.

Die folgenden Kapitel beschreiben die statistische Erfassung von Betonprüfungen im Zeitraum September 1976 bis Februar 1980, deren Interpretation und Vergleiche mit Angaben aus Untersuchungen in der Fachliteratur.

Gedankt sei der Abteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (ASK) des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW), der Bauherrin (Kernkraftwerk Leibstadt AG) und der Arbeitsgemeinschaft Marti AG / Spycher AG, welche die Auswertung der Prüfergebnisse ermöglicht haben.

### Herstellung von Betonwürfeln und Bohrkernzylindern

Der auf der Baustelle verwendete Pumpbeton mit einem mittleren Wasserzementfaktor von etwa 0,56 weist ein Grösstkorn von 50 mm auf (bei einzelnen Wänden und Decken 30 mm). Über die Kornverteilung gibt Diagramm 1 Auskunft. Als Zusatz wurden sowohl Plastifizierungsmittel als auch Abbindeverzögerer verwendet.

Die Betonprobewürfel wiesen die üblichen Abmessungen 20/20/20 cm auf. Sie wurden aus Mischungen während des Betoniervorgangs laut Prüfprogramm entnommen. Während des Erhärtens in der Stahlschalung verblieben die Würfel im Freien, unmittelbar beim gleichzeitig betonierten Bauteil (rund 24 h). Anschliessend sind die Prüfkörper drei Tage im Wasserbad und 24 Tage im Baustellenlabor bei etwa 18 °C und 60 Prozent relativer Luftfeuchtigkeit gelagert worden. Die Studie umfasst insgesamt 390 Würfeldruckversuche.

Die dem Bauwerk entnommenen Bohrkerne wiesen Durchmesser von 50 und

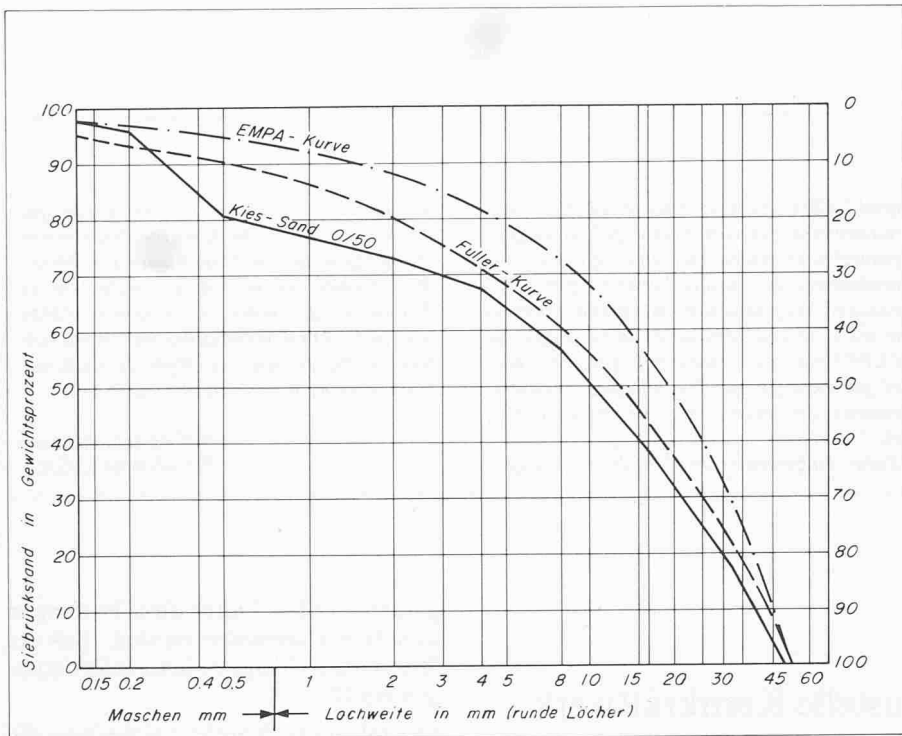


Diagramm 1. Typische Siebkurve 0/50 mm

Tabelle 1. Druckfestigkeit von Bohrkernen und separat hergestellten Würfeln

Ø	βBKt			βBK28			βw28		
	$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n
50	38,1	6,9	517	36,5	6,3	517	46,4	5,0	247
98	37,6	6,3	89	36,2	5,9	89	43,7	4,4	86
Total							45,7	5,0	333

- Ø Durchmesser Bohrkernzylinder (mm)
- βBKt Bohrkerndruckfestigkeit im Zeitpunkt t (zwischen 28 und 117 Tagen) des Versuchs (N/mm<sup>2</sup>)
- βBK28 Bohrkerndruckfestigkeit reduziert auf die 28-Tage-Druckfestigkeit (N/mm<sup>2</sup>)
- βw28 Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen (N/mm<sup>2</sup>)

$$\text{Mittelwert } \bar{X} = \frac{\sum Xi}{n}$$

$$\text{Standardabweichung } s = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1}}$$

n Anzahl Prüfkörper

98 mm auf. Das Betonalter im Zeitpunkt des Druckversuchs schwankte zwischen 28 und 117 Tagen. Die Eidg. Materialprüfungsanstalt (EMPA) führte die Bearbeitung der Bohrkern- (Schneiden und Schleifen der Oberflächen) und die Druckversuche durch. Über die Bohrrichtung gibt die Art der Bauteile Auskunft: Wände und Stützen sind mit einigen Ausnahmen horizontal, Fundamente und Decken vertikal angebohrt worden. Die Untersuchung umfasst 567 Bohrkernproben mit einem Durchmesser von 50 mm und 159 mit einem solchen von 98 mm.

Die Entnahme der Bohrkern- erfolgte teilweise aufgrund einer negativen Auswahl, d.h. Stellen mit mutmasslich geringerer Festigkeit wurden bevorzugt angebohrt. Es ist daher anzunehmen, dass das Verhältnis von Bohrkern- zu Würfeldruckfestigkeit im Durchschnitt etwas höher liegt als nachstehend angegeben.

Neben der Festigkeit der Prüfkörper konnten u.a. folgende Daten festgehal-

ten werden: Bauteil (Betonieretappe), Probenalter im Zeitpunkt der Prüfung, Rohdichte, Betonrezept, Wasserzementfaktor (geschätzt aufgrund von Frischbetonkonsistenzversuchen), genaue Lage der Bohrung (Bohrkerne), Witterung und Temperatur beim Einbringen.

### Einflüsse auf Festigkeitsentwicklung und Druckfestigkeitsergebnis von Betonprüfkörpern

Die unterschiedliche Festigkeitsentwicklung von separat hergestellten Betonwürfeln und dem Bauwerk entnommenen Prüflingen derselben Betonieretappe ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:

- a) Herstellung des Frischbetons: Abweichungen von der Siebkurve, Schwankungen des Wasserzementfaktors infolge variabler Feuchtig-

- keit der Zuschlagstoffe, ungleiche Mischdauer, Dosierungsschwankungen bei den Zusatzmitteln, variable Temperatur der Zuschlagstoffe
- b) Verarbeitung: Transport und Einbringen der Mischung, Verdichtungsgrad, Art der Nachbehandlung
- c) Umgebung: Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf während der Herstellung, Verarbeitung und Lagerung

Parameter, die zusätzlich das Druckfestigkeitsergebnis beeinflussen:

- d) Prüfkörperdimensionen: Schlankheit, Querschnittform, Querschnittsgrösse, Verhältnis Grösstkorn zu Probendurchmesser
- e) Prüfkörperherstellung: Bearbeitung der Oberflächen, Gefügelockerungen beim Bohren und angeschnittenes Gefüge bei herausgearbeiteten Proben
- f) Prüfmaschine: Steifigkeit der Presse, Belastungsgeschwindigkeit, Genauigkeit der Anzeige

Alle unter d) bis f) angeführten Parameter sind im vorliegenden Fall bekannt und teilweise in der Norm SIA 162 [1] festgelegt. Ihr Einfluss auf das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung wurde in zahlreichen Untersuchungen – z.T. allerdings mit divergierenden Schlussfolgerungen – analysiert. Von den übrigen Faktoren sind bei separat hergestellten Betonwürfeln Verarbeitung und Umgebung genormt, beim Bauwerkbeton hingegen variieren sie je nach Qualität des eingesetzten Personals, Bauteilgrösse und Witterungsverlauf.

## Ergebnisse

### Druckfestigkeit und Rohdichte

In diesem Abschnitt wurden nur Betonieretappen berücksichtigt, bei denen sowohl Bohrkern- als auch Würfel zur Verfügung standen.

In den Tabellen 1 und 2 sind mittlere

Tabelle 2. Rohdichte von Bohrkernen und separat hergestellten Würfeln

Ø	ρBKt			ρw28		
	$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n
50	2360	50	115	2440	30	247
98	2380	40	37	2440	20	81
Total	2360	50	152	2440	30	328

- ρBKt Rohdichte des Bohrkerns im Zeitpunkt t des Versuchs (kg/m<sup>3</sup>)
- ρw28 Rohdichte des Würfels nach 28 Tagen (kg/m<sup>3</sup>)

Tabelle 3. Quotienten aus Bohrkern- und Würfel- druckfestigkeit, bzw. Bohrkern- und Würfelrohddichte

Ø	βBKt/βw28	βBK28/βw28	ρBKt/ρw28
50	0,85	0,81	0,97
98	0,84	0,80	0,98

Druckfestigkeit und Rohdichte von Bohrkernen und Betonwürfeln zusammengestellt. Es wird zwischen Bauwerkteilen (Betonieretappen), denen 50-mm- bzw. 98-mm-Bohrkerne entnommen wurden, unterschieden. Die Umrechnung der im Zeitpunkt  $t$  ermittelten Bohrkernfestigkeiten auf die 28-Tage-Festigkeit erfolgt nach Art. 9.16 der Norm SIA 162 [1]. Die angenommene Festigkeitsentwicklung gilt für normgemässe Lagerung von Prüfkörpern, was beim Bauwerkbeton in der Regel nicht zutrifft. Aus diesem Grund sind die 28-Tage-Festigkeiten der Bohrkerne mit Vorsicht zu interpretieren.

Jeder Bohrkern konnte in ein bis sechs Prüfzylinder mit der Schlankheit  $h/d = 1,0$  zersägt werden. In der Zusammenstellung ist die Festigkeit jedes Probekörpers einzeln berücksichtigt.

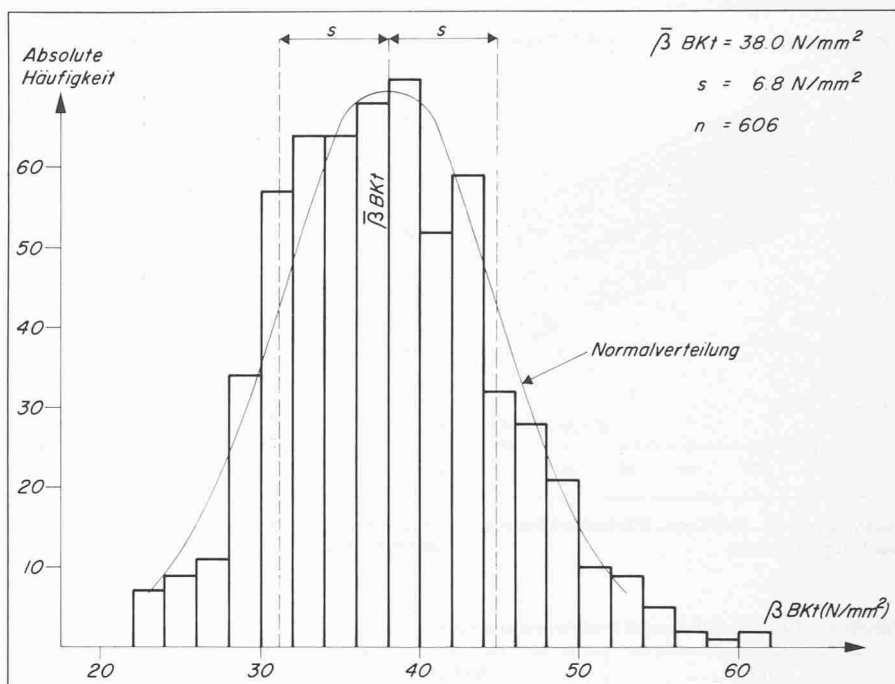


Diagramm 2. Histogramm Bohrkernfestigkeit

**Häufigkeitsverteilung der Druckfestigkeit**

Über die Häufigkeitsverteilung der Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit geben die Diagramme 2 und 3 Auskunft.

**Zusammenhang zwischen Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit**

Die Festigkeiten der Bohrkern- und Würfel können je Gebäudesektor (Betonieretappe) zu Mittelwerten zusammengefasst und einander gegenübergestellt werden (Diagramme 4 und 5). Neben der Regressionsgeraden sind im Abstand von je einer Standardabweichung des Schätzwertes Kontrollgrenzen eingezeichnet, innerhalb deren etwa 68 Prozent aller Werte zu vermuten sind.

Berechnet man das Verhältnis Bohrkern- zu Würfeldruckfestigkeit je Betonieretappe und vergleicht es mit dem Niveau der Würfeldruckfestigkeit, so resultiert der in den Diagrammen 6 und 7 gezeigte Zusammenhang.

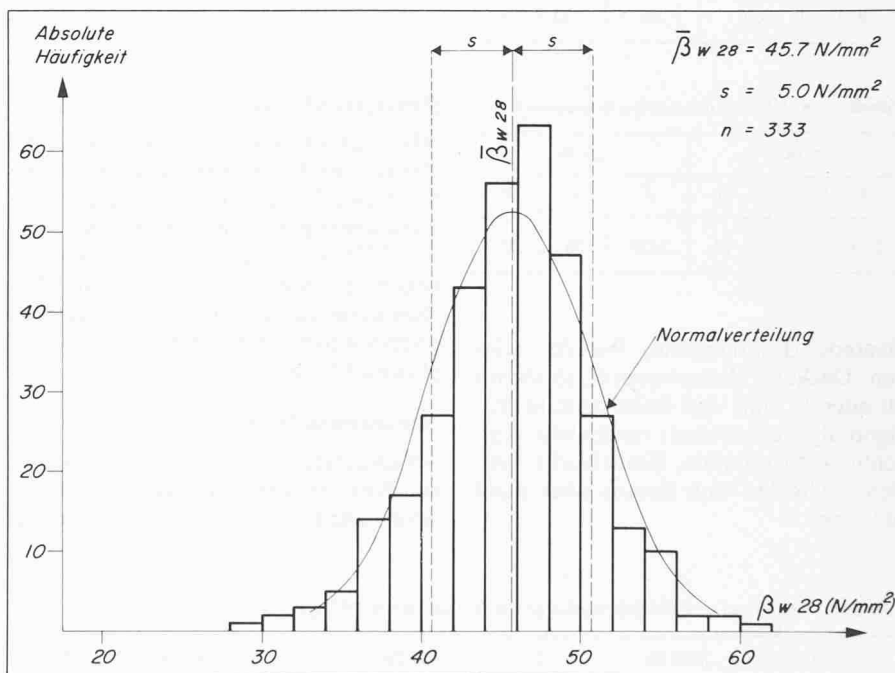


Diagramm 3. Histogramm Würfeldruckfestigkeit

**Zusammenhang zwischen Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit und Entnahmhöhe**

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Entnahmhöhe und Festigkeit von Bohrkernen in hohen Bauteilen wurden einige Wände (Stärke zwischen 25 und 100 cm) und eine Stütze speziell ausgewertet. Die in den Diagrammen 8, 9 und 10 figurierende Auflasthöhe ( $H_A$ ) ist als Bauteilhöhe abzüglich Entnahmhöhe definiert. Die Stütze mit quadratischem Querschnitt (120x120 cm) wies eine Höhe von 590 cm auf.

**Weitere Zusammenhänge**

Es wurde auch versucht, durch eine Gruppierung der Daten nach Art der

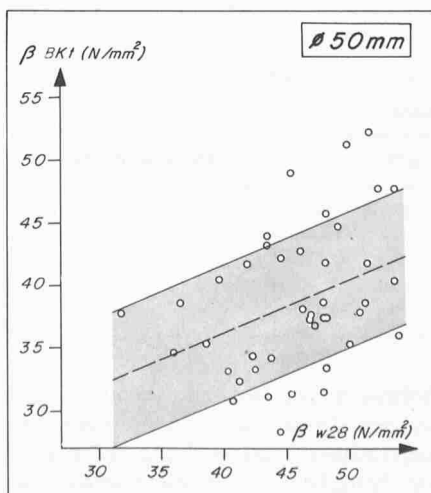


Diagramm 4. Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit

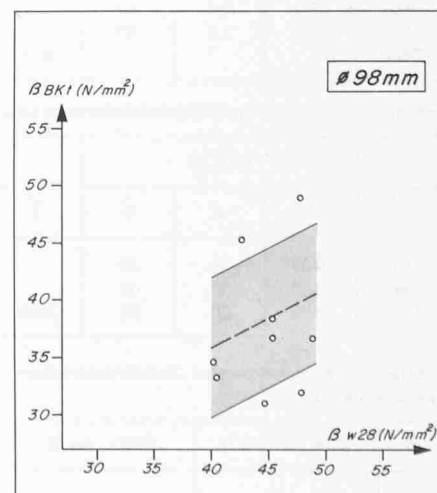


Diagramm 5. Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit

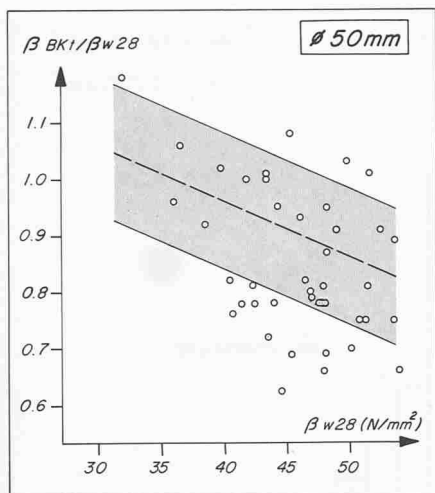


Diagramm 6. Bohrern-/Würfeldruckfestigkeit und Festigkeitsniveau

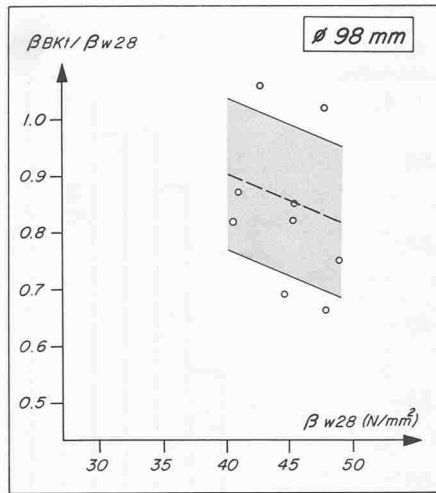


Diagramm 7. Bohrern-/Würfeldruckfestigkeit und Festigkeitsniveau

Tabelle 4. Druckfestigkeiten der Reaktorfundamentplatte

βBKt			βBK28			βw28		
$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n
49,1	6,9	30	44,7	6,2	30	44,4	3,7	57

Tabelle 5. Rohdichten der Reaktorfundamentplatte

ρBKt			ρw28		
$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n
2340	50	17	2430	20	57

Bauteile (Fundamente, Wände, Stützen, Decken), Betonrezept (Grösstkorn 50 oder 30 mm) und Bohrrichtung (horizontal oder vertikal) zusätzliche Aufschlüsse zu erhalten. Einheitliche Tendenzen liessen sich daraus aber nicht ableiten.

**Reaktorfundament**

Als Spezialfall sind die Resultate des Reaktorfundamentbetons in den Tabellen 4 und 5 angefügt. Die 4,35 m starke Fundamentplatte mit einer Kubatur von 5750 m<sup>3</sup> Beton wurde ohne Arbeitsfugen im Schichtbetrieb erstellt. Die Bohrkerne mit einem Durchmesser von 98 mm entstammen 18 Bohrungen von je rund 200 cm Tiefe.

**Stützenversuchsreihe**

Abschliessend sei eine Versuchsreihe erwähnt, bei der zehn Stützen mit den Abmessungen 50 × 100 × 285 cm auf

Tabelle 6. Bohrern- und Würfelfestigkeiten von 10 Stützen (t = 28 Tage)

∅	βBK28			βw28			βBK28 aus Würfel		
	$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n
50	38,9	2,4	40				44,0		10
98	35,2	3,1	40						
Total				43,9		10			

Tabelle 7. Bohrern- und Würfelrohddichten von zehn Stützen

∅	ρBK28			ρw28			ρBK28 aus Würfeln		
	$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n	$\bar{X}$	s	n
50	2400	30	40				2440		10
98	2380	30	40						
Total	2390	30	80	2440		10			

Tabelle 8. Festigkeits- und Rohddichteverhältnis von zehn Stützen

∅	$\bar{\rho}BK28 / \bar{\rho}w28$	$\bar{\rho}BK / \bar{\rho}w28$
50	0,89	0,98
98	0,80	0,98

Bohrkern- und Würfelfestigkeit geprüft wurden. Diese von der Unternehmung angeordnete Untersuchung sollte über die Festigkeitsbeeinflussung durch Variation des Zusatzmittels, der Mischzeit und der Vibrationszeit Auskunft geben.

Bohrkerne und Würfel einer Stütze stammen aus derselben Mischcharge. Die Bohrkerne wurden in vier verschiedenen Höhen entnommen. Erstaunlicherweise ist keine Festigkeitsabnahme mit zunehmender Höhe nach 28 Tagen zu verzeichnen. Erst nach 90 Tagen zeigte sich im tieferen Bereich der Stützen eine höhere Festigkeit. Zusätzlich sollte der Einfluss von Prüfkörpergestalt und -herstellung abgeschätzt werden. Zu diesem Zweck sind den Würfelproben Bohrkerne entnommen worden. Spezielle Sorgfalt bei Herstellung und Verarbeitung ist bei dieser Versuchsreihe nicht auszuschliessen. Die Tabellen 6, 7 und 8 geben Auskunft über Festigkeit, Rohdichte und deren Streuung.

**Diskussion der Resultate**

**Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit**

Die mittlere Festigkeit der Bohrkerne liegt erwartungsgemäss niedriger als die der Würfel. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass bei einem Teil der Bohrkerne eine negative Auswahl getroffen wurde. Trotzdem erreicht der Nennwert der Bohrkernefestigkeit, berechnet aus Mittelwert abzüglich Standardabweichung unter Annahme einer Gausschen Verteilung, den für separat gefertigte Würfel geforderten Wert von 30 N/mm<sup>2</sup> (hochwertiger Beton BH).

Der Quotient aus Bohrern- und Würfeldruckfestigkeit beträgt zwischen 0,80 und 0,85, je nach Grösse und Alter der Bohrkerne. Lewandowski [2] stellte in einer Untersuchung von 21 Baustellen ein Verhältnis von 0,85 fest, während Henzel und Grube [3] sowie Mehmel [4] für eine Grossbaustelle mit 90 Tage alten Proben ein Mittel von 0,79 fanden. Die eigenen Resultate sind somit in der üblichen Grössenordnung. Die erwähnten Autoren stützen sich allerdings auf Proben mit grösserem Bohrerndurchmesser (100 und 150 mm). Beim Vergleich mit anderen Untersuchungen ist immer Vorsicht geboten, weil den Versuchen in der Regel unterschiedliche Randbedingungen zugrunde liegen.

Die beiden Diagramme 2 und 3 veranschaulichen die Seriencharakteristik von Bohrern- und Würfelprüflingen: Laborbedingungen bei Verarbeitung und Lagerung des Betons ermöglichen günstige Ergebnisse bezüglich Mittelwert und Streuung der Druckfestigkeit. Der Homogenisierungseffekt einer genormten Verdichtung und Lagerung manifestiert sich in der kleineren Standardabweichung der Würfeldruckfestigkeit.

Zwischen Würfelfestigkeitsstreuung und Qualität der Baustellenüberwachung besteht ein offensichtlicher Zusammenhang. Gemäss Cementbulletin [5] kann die Baustelle mit einer Stan-

dardabweichung von rund  $5 \text{ N/mm}^2$  hinsichtlich Überwachung als normal eingestuft werden.

Während die grössere Streuung bei Bohrkernen einleuchtend mit variablen Verarbeitungs- und Erhärtungsbedingungen zu erklären ist, sollte die Frage der *Mittelwertdifferenz* zwischen Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit genauer unter die Lupe genommen werden. Wir kommen später auf dieses Problem zurück.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Bohrkerndurchmesser, so fällt auf, dass

- die mittlere Druckfestigkeit der 50-mm-Bohrkerne geringfügig höher liegt und
- die Streuung beim grösseren Durchmesser niedriger ausfällt, wobei der Unterschied in beiden Fällen nicht signifikant ist.

Viele Autoren stellen übereinstimmend *wachsende Festigkeit mit abnehmendem Bohrkerndurchmesser* fest. Dieser empirisch gefundene Zusammenhang stützt sich auf eine Hypothese, nach der bei grösseren Körpern aus inhomogenem Material die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Schwachstellen infolge Streuung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften zunimmt.

Einzig *Petersons* [6] fand bei Betonzyllindern mit einer Schlankheit  $h/d = 2,0$  ein *abweichendes Verhalten*: Probekörper mit 50 mm Durchmesser und einem Grösstkorn von 40 mm wiesen geringere Festigkeiten auf als Zylinder mit den doppelten Abmessungen. Genau das Gegenteil resultierte bei einem Beton mit kleinerem Grösstkorn. *Bellander* [7] vermutet die folgenden *Zusammenhänge*: Abnehmende Festigkeiten bei Bohrkerndurchmessern  $< 70 \text{ mm}$  sind auf Gefügeschädigungen beim Herausbohren und auf grössere Variation der Partikelgrösse im Querschnitt zurückzuführen. Das Verhältnis von Probendurchmesser zu Grösstkorn scheint somit einen erheblichen Einfluss auszuüben. In unserem Fall beträgt dieser Quotient für 50-mm-Bohrkerne 1,0. Er unterschreitet den üblicherweise empfohlenen Minimalwert von 2,0. Gefügestörungen durch das Umbohren und verändertes Bruchverhalten bei Einschluss von grobem Korn sind deshalb nicht auszuschliessen, was die Aussagekraft der Bohrkern mit 50 mm Durchmesser reduziert.

Die *mittlere Rohdichte der Bohrkern* liegt verglichen mit der der Würfel signifikant tiefer. *Gaede* [8] und *Williamson* [9] fanden eine positive Korrelation zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit von Betonwürfeln. Unter der Annahme dieses weitgehend akzeptierten Zusammenhangs dürfte die Analogie zum Festigkeitsverhältnis von Bohrkernen und Würfeln auf der Hand liegen.

Die Gegenüberstellung von Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit derselben Betonieretappe ergibt keine straffe Korrelation zwischen beiden Grössen. Dies liegt an den vom Labor gänzlich verschiedenen Verarbeitungs- und Umgebungsverhältnissen des Bauwerkbetons. Es lässt sich lediglich feststellen, dass eine hohe Würfeldruckfestigkeit wohl eine notwendige, nicht aber hinreichende Bedingung für einen Bauwerkbeton guter Qualität darstellt.

Die Diagramme 6 und 7 stellen die *Relation zwischen dem Quotienten Bohrkern-/Würfeldruckfestigkeit und dem Niveau der Würfeldruckfestigkeit* dar. Mit wachsender Würfeldruckfestigkeit nimmt dieses Verhältnis ab, d.h. je höher das Festigkeitsniveau des labormässig bearbeiteten und gelagerten Betons, desto grösser die Differenz zwischen Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit. Dies folgt direkt aus dem in den Diagrammen 3 und 4 dargestellten Zusammenhang. Die Ergebnisse stimmen mit Untersuchungen von *Lewandowski* [2] und *Petersons* [10] in der Tendenz überein.

#### Bohrkerndruckfestigkeit und Entnahmhöhe

*Geringere Bohrkernfestigkeiten mit abnehmender Auflasthöhe bei hohen Bauteilen* bringen die Diagramme 8, 9 und 10 zum Ausdruck. Nach *Bellander* [7] sind für diese Erscheinung die folgenden Faktoren verantwortlich: Absinken der Zuschlagstoffe und Aufsteigen des flüssigen Anteils vor dem Erhärten (insbesondere bei hohem Wasserzementfaktor), Differenzen des hydrostatischen Drucks im Frischbeton, evtl. verspätete oder unterlassene Nachbehandlung des Betons. Ein interessantes Experiment mit Stützen gelang *Petersons* [6], als er während des Erhärtungsprozesses eine statische Last auf den Säulenbeton wirken liess, wodurch sich die Festigkeit der obersten Partien erhöhte.

#### Stützenversuchsreihe

Wie stark die *Abhängigkeit der Festigkeit von der Bauteilhöhe* beeinflusst werden kann, illustriert die in den Tabellen 6, 7 und 8 dargestellte Untersuchung: Wie schon erwähnt, wurden die Bohrkern den Versuchsstützen in vier verschiedenen Höhen entnommen. Im Mittel über alle zehn Stützen wies die oberste Bohrkernlage (10 cm unterhalb des Säulenkopfes) nach 28 Tagen die höchste Festigkeit auf! Erst nach 90 Tagen zeigte sich in den unteren Partien eine deutliche höhere Festigkeit. Dieser Versuch, bei dem eine Festigkeitsoptimierung mit verschiedenen Zusatzmitteln und erhöhten Misch- sowie Vibrationszeiten angestrebt wurde, zeigt, in welchem Mass eine Homogenisierung des Betons in hohen Bauteilen auch unter Baustellenbedingungen zu realisieren

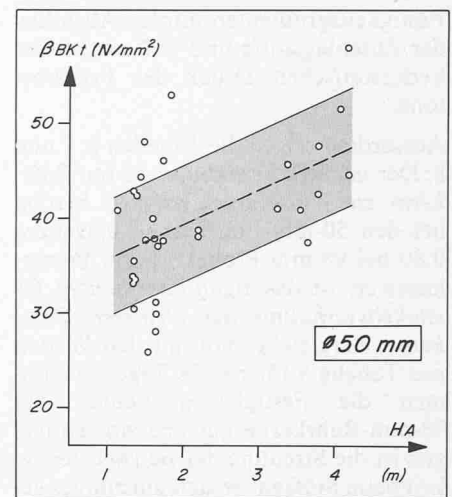


Diagramm 8. Bohrkerndruckfestigkeit und Auflasthöhe (Wände)

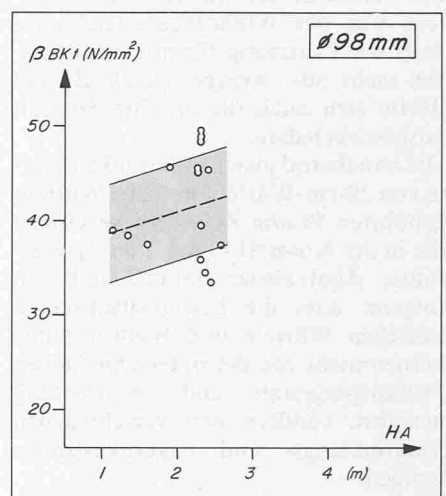


Diagramm 9. Bohrkerndruckfestigkeit und Auflasthöhe (Wände)

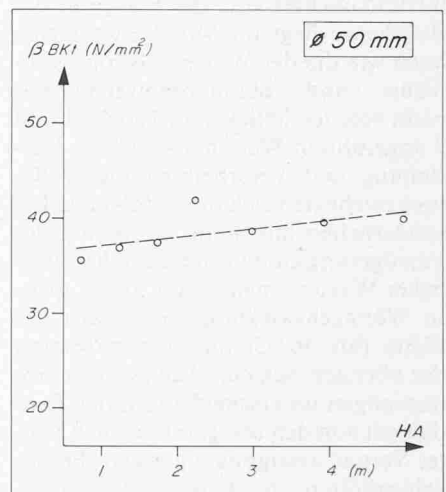


Diagramm 10. Bohrkerndruckfestigkeit und Auflasthöhe (eine Stütze)

ist. Die Verbesserung resultierte hauptsächlich aus einer einwandfreien Verdichtung und Nachbehandlung der obersten Bauteilabschnitte. Beide Faktoren scheinen von viel grösserer Bedeutung für die Festigkeit zu sein als der Einfluss eines «naturegebenen»

Festigkeitsgradienten infolge Absinken der Zuschlagstoffe und Differenzen im hydrostatischen Druck des Frischbetons.

Ausserdem zeigen die Tabellen 6, 7 und 8: Der *mittlere Verhältniswert von Bohrkern- zu Würfeldruckfestigkeit* beträgt bei den 50-mm-Bohrkernen 0,89 bzw. 0,80 bei 98-mm-Probekörpern. Bemerkenswert ist das *signifikant höhere Festigkeitsverhältnis der kleineren Bohrkern-kerne*. Vergleicht man mit den Werten aus Tabelle 3 für  $t = 28$  Tage, so stimmen die Festigkeitsquotienten der 98-mm-Bohrkerne gut überein. Hingegen ist die Streuung der Bauwerkfestigkeit beim Stützenversuch um einiges geringer. Sie liegt in derselben Grössenordnung wie jene der Würfeldfestigkeit. Dies hat vor allem zwei Gründe: Erstens sind nur gleichförmige Bauteile in der Versuchsreihe enthalten und zweitens war der Witterungsverlauf während der Erhärtung für alle zehn Stützen mehr oder weniger gleich. Zudem dürfte sich auch die erhöhte Sorgfalt ausgewirkt haben.

Die annähernd gleichen Festigkeitswerte von 20-cm-Würfeln und aus Würfeln gebohrten 50-mm-Zylindern bestätigen die in der Norm SIA, Art. 2.06 [1] angeführte Äquivalenz. Daraus lässt sich folgern, dass die Festigkeitsdifferenz zwischen Würfeln und Bauwerkbohrkernen nicht von der unterschiedlichen Prüfkörpergestalt und -bearbeitung herrührt, sondern von verschiedenen Verarbeitungs- und Lagerungsbedingungen.

### Reaktorfundament

Sehr günstige Erhärtungsbedingungen herrschten beim Betonieren des Reaktorfundamentes vor: Die Festigkeit der Bohrkern-kerne liegt im Mittel etwa gleich hoch wie die der Würfel, obwohl Rohdichte und Standardabweichungen nicht von den üblichen in Tabelle 1 und 2 angeführten Werten abweichen. Herstellung und Verarbeitung dieses Betons zeichneten sich durch folgende Besonderheiten aus: hohe Dosierung des Verzögerungsmittels, überdurchschnittlicher Wasserzementfaktor (0,59), grosse Wärmeentwicklung im Innern der Platte (bis 56 °C) und Nachvibration der obersten Schicht. Auch in den Abmessungen unterscheidet sich das Fundament von den übrigen Bauteilen. Unter Vernachlässigung einer evtl. Festigkeitserhöhung durch das Verzögerungsmittel haben vor allem Nachverdichtung, hohe Eigenwärme und Massigkeit des Bauteils trotz leicht erhöhtem Wasserzementfaktor eine grössere Bauteilfestigkeit bewirkt. Derart vorteilhafte Erhärtungsbedingungen sind aber nicht typisch für die Mehrzahl der Bauteile. Die erzielten Festigkeiten dürfen daher auch nicht an den übrigen Resultaten gemessen werden.

### Festigkeitsentwicklung von Bauwerk- und Würfelbeton

Wir kommen zurück auf die Frage nach der *unterschiedlichen Festigkeitsentwicklung von Bohrkern und Würfel*. Die im Vergleich zum Bauwerkbeton höhere Druckfestigkeit der Würfel scheint vorwiegend auf einem *grösseren Verdichtungsgrad* zu beruhen. Ein deutliches Indiz für diese Behauptung ist die *geringere Rohdichte der Bohrkern-kerne*, die einem grösseren Porenvolumen gleichzusetzen ist. Nach Rüschi [12] sind durch unvollkommene Verdichtung entstehende Luftporen in ihrer Auswirkung einer Erhöhung des Anteils an verdunstbarem Wasser gleichzusetzen. Der Festigkeitsverlust kann deshalb mit Hilfe des bekannten Zusammenhanges zwischen Wasserzementfaktor und Druckfestigkeit abgeschätzt werden, indem das zusätzliche Porenvolumen - berechnet als Wassermenge - einen vergrösserten Wasserzementfaktor ergibt.

Im weiteren beeinflusst das *Klima der Umgebung* die Festigkeitsentwicklung: Temperatur und Feuchtigkeit sind bei den im Labor gelagerten Würfeln genormt: «Proben, die unter normgemässen Bedingungen gelagert werden sollen, sind nach der Herstellung 1 bis 2 Tage bei Temperaturen von möglichst 15 bis 20 °C in der Form zu lagern und alsdann für die normgemässe Behandlung der Prüfstelle zu übergeben. Als normgemässe Behandlung gilt eine Lagerung bei mittlerer Lufttemperatur von 18 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90 Prozent.» Auf der untersuchten Baustelle werden die Probekörper nach dem Ausschalen drei Tage im Wasserbad gelagert. Dies begünstigt die Festigkeitsentwicklung, da während dieser Periode kein Wasser verdunsten kann. Der *Zusammenhang zwischen Wasserlagerung und Druckfestigkeit* ist z. B. von der EMPA [11] eindrücklich nachgewiesen worden. Es leuchtet ein, dass die vollständige Verhinderung der Verdunstung in dieser für die Festigkeitsentwicklung des Betons so wichtigen Phase mit den Verhältnissen, unter denen der Bauwerkbeton erhärtet, nicht viel gemeinsam hat.

Analog zur Feuchtigkeit verhält sich die Umgebungstemperatur, die im Labor in der Regel 18 °C beträgt, im Freien aber durchaus Tagesschwankungen von 15 °C unterliegen kann.

Versucht man den Klimafaktor auszuschalten, indem Bauteil und Probewürfel im selben Raum hergestellt und gelagert werden, so ergibt auch diese Anordnung keinen straffen Zusammenhang zwischen Bauteil- und Probewürfeldfestigkeit. Dieses Resultat erbrachte eine von der EMPA [13] durchgeführte Untersuchung. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass erstens der schon erwähnte unterschiedliche Verdich-

tungsgrad einen erheblichen Einfluss auszuüben scheint und dass zweitens der weitgehend unbekannte Wasser- und Temperaturhaushalt des Betons bei der grösseren Massigkeit des Bauteils von Bedeutung sein könnte.

Diese Überlegungen sind zum grössten Teil *hypothetischer* Natur. Eine eingehende Untersuchung der angesprochenen Zusammenhänge wäre deshalb sehr zu begrüssen. Mit Sicherheit lässt sich aber sagen: Die Verarbeitungs- und Lagerungsbedingungen der Probewürfel sind von denen der Bauteile derart verschieden, dass von der Würfeldfestigkeit keine genügend präzise Aussage über die Bauwerkfestigkeit zu erwarten ist.

### Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Untersuchung beruhen auf Versuchen einer einzigen Baustelle, wobei der verwendete Baustoff - Pumpbeton mit einem Wasserzementfaktor von etwa 0,56 und einem Maximalkorn von 50 mm - nicht typisch für die hiesigen Verhältnisse ist. Erst umfangreiche Erhebungen über die Bauwerkfestigkeit und der sie bestimmenden Faktoren lassen Verallgemeinerungen zu. Immerhin können die folgenden Punkte festgehalten werden:

- Die *Bauwerkfestigkeit* - ermittelt an Kleinbohrkernen mit Durchmesser 50 und 98 mm im Alter zwischen 28 und 117 Tagen - liegt in der Regel unter der Festigkeit von separat verarbeiteten Prüfkörpern. In der Grössenordnung ähnliche Festigkeiten sind nur unter optimalen Verarbeitungsbedingungen auf der Baustelle zu erzielen.
- Von der *Würfeldruckfestigkeit* lässt sich nur sehr bedingt auf die Festigkeit des zugehörigen Bauteils schliessen. Hohe Würfeldfestigkeiten bilden wohl eine notwendige, nicht aber hinreichende Bedingung für eine gute Bauwerkfestigkeit.
- Der geringe *Zusammenhang zwischen Würfel- und Bohrkernfestigkeit* liegt in der wesentlichen Feststellung begründet, dass Versuche an separat verarbeiteten Prüfkörpern nur über die Frischbetonherstellung Auskunft geben und somit den Einfluss der Bauwerkbetonverarbeitung (Einbringen, Verdichten, Nachbehandeln) nicht erfassen.
- Für alle an der Herstellung eines Bauwerks beteiligten Gruppen (Bauherr, Projektverfasser, Bauleitung, Unternehmer) ist die *effektiv erzielte Bauwerkfestigkeit* von vorrangigem Interesse. Ihr ist *Priorität* bei der Qualitätsbeurteilung eines Bauwerks ein-

zuräumen. Druckfestigkeitsversuche dürfen deshalb nicht auf die speziell verarbeiteten Würfel beschränkt bleiben.

- Analog den Vorschriften bei *separat gefertigten Würfeln* sollten die dem *Bauwerk zu entnehmenden Proben* (Grösse, Anzahl, Verteilung) sowie die Anforderungen an die *Festigkeit* dieser Proben festgelegt werden. Der etwas höhere Aufwand für das Herausbohren und Prüfen der Bohrkerne wird zumindest bei grösseren Baustellen durch die realitätsnahe Aussage bei weitem wettgemacht.
- Den Ausführenden ist die *ausserordentliche Bedeutung der Betonverarbeitung* im Blick auf die Erzielung hoher Bauwerkfestigkeit und Homogenität aufzuzeigen. Verdichtung und Nachbehandlung sind mit grosser Sorgfalt und Sachkenntnis auszuführen.
- Untersuchungen mit den nachstehenden Schwerpunkten könnten die angesprochenen Zusammenhänge erklären helfen: *Charakterisierung des Temperatur- und Feuchtigkeitsverlaufs* im Bauwerkbeton, *Vergleich des Verdichtungsgrades von Würfel und Bauwerkbeton*, *systematische Erfassung des Einflusses verschiedener Nachbehandlungsmethoden auf die Festigkeit*, *Relation zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit von Betonprüflingen*, *Zusammenhang zwischen Wasserzementfaktor und Festigkeitseinbussen im oberen Bereich von hohen Bauteilen*, *Bohrkernfestigkeit in Funktion der Bohrtiefe und Bohrrichtung*.

Inwiefern die an den Probekörpern ermittelten Resultate auf die Bauwerkfestigkeit *übertragen* werden dürfen, bleibt im Rahmen dieser Untersuchung dahingestellt. Es seien hier nur zwei Anmerkungen erlaubt:

#### Literatur

- [1] Norm für die Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Bauwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; SIA 162. Schweiz. Ingenieur- und Architektenverein, 1972, Zürich
- [2] Lewandowski, R.: «Beurteilung von Bauwerkfestigkeiten an Hand von Betongüewürfeln und -bohrproben». Werner-Verlag, Düsseldorf, 1971
- [3] Henzel, J., Grube, H.: «Festigkeitsuntersuchungen an Bauwerkbeton und zugehörigen Gütewürfeln». Der Bauingenieur, 41, 1966, Berlin
- [4] Mehmel, A.: «Über einige Grundlagen des modernen Massivbaus». Der Bauingenieur, 42, 1967, Berlin
- [5] Beziehung Nennwert- mittlere Würfel-druckfestigkeit. Cementbulletin, Nr. 11, 1974, Wildegg
- [6] Petersons, N.: «Strength of concrete in finished structures». Kungl. Tekniska Högskolans Handlingar, Nr. 232, 1964, Stockholm
- [7] Bellander, U.: «Concrete strength in finished structures». Swedish cement and concrete research institute, 1976, Stockholm
- [8] Gaede, K.: «Über den Einfluss der Grösse der Proben auf die Würfel-druckfestigkeit von Beton». Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 144, 1962, Berlin
- [9] Williamson, G.R.: «An investigation of standard concrete cylinders». Journal American Concrete Institute, Febr 1964
- [10] Petersons, N.: «Should standard cube test specimens be replaced by test specimens taken from structures?». RILEM-Matériaux et Constructions 425, 1968
- [11] EMPA-Untersuchungsbericht Nr. 10481: «Zum Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Biegezug- und Druckfestigkeit von 28 Tage alten Betonprobekörpern». 1977, Dübendorf
- [12] Rüschi, H.: «Stahlbeton-Spannbeton», Band 1. Werner-Verlag, 1973, Düsseldorf
- [13] EMPA-Untersuchungsbericht Nr. 10709/1: «Bestimmung der Betonfestigkeit am Bauwerk. Vergleich Kleinbohrkern-Lok-Test». 1977, Dübendorf
- [14] Walz, K. und Wischers: «Über Aufgaben und Stand der Betontechnologie». Beton-technische Berichte, Beton Verlag 1976, Düsseldorf
- [15] Woermann: «Beton, Vorschrift und Praxis. Wilhelm Ernst & Sohn, 1977, Berlin

1. Diskussion des für die Bestimmung der Tragfähigkeit massgebenden Spannungszustandes: Im sogenannt einaxigen Druckversuch tritt infolge Reibung zwischen Druckplatte und Prüfling ein mehraxiger Spannungszustand auf. Dieser wirkt sich bei gedruckten Probekörpern günstig auf das Druckfestigkeitsergebnis aus. Wieweit sich diese Verhältnisse auf ein beanspruchtes Bauteil übertragen lassen, kann hier nicht erörtert werden.
2. Frage nach der Dauer der vorhandenen Lasteinwirkungen: Walz und Wischers [14] erwähnen die Dauerstandfestigkeit des Betons, die unter ruhender Belastung um etwa 15 bis 20 Prozent unter der in den üblichen Versuchen gefundenen Kurzzeitfestigkeit liegt. Die Dauerstandfestigkeit unter wechselnder Last ist noch niedriger anzusetzen.

In diesem Sinne eine abschliessende Bemerkung von Woermann [15]: «Die durchweg mit homogenen Eigenschaften ausgestatteten, am Bau oder im Laboratorium hergestellten Prüfkörper werden überbewertet, indem ihnen für die Beurteilung eines Betons volle Aussagekraft beigemessen wird. In Wirklichkeit muss aber am Bauwerk selber nicht nur die ganze Ausfüllung der Schalung, sondern auch eine satte Um-mantelung der Stahleinlagen (auch von Rohren usw.) sowie die Füllung aller Hohlräume – auch in schwierigen Bereichen – sichergestellt sein. Das sind Verhältnisse, die mit denen der kleinen Prüfkörper so gut wie nichts gemein haben.»

Adresse der Verfasser: K. Geistlich, dipl. Ing. ETH, und M. Ghielmetti, dipl. Ing. ETH, Ingenieurbüro F. Preisig, Grünhaldenstr. 6, 8050 Zürich.