

# Luftporengehalte üblicher Normalbetone

Von Bernhard Dartsch, Düsseldorf

## Übersicht

*Über den Gehalt an natürlichen Luftporen in „praktisch vollständig verdichtetem“ Normalbeton üblicher Zusammensetzung sind keine systematischen Feststellungen bekannt. Der Luftgehalt ist u. a. bei der Errechnung des Stoffraumes von 1 m<sup>3</sup> des verdichteten Betons von Bedeutung. Man geht im allgemeinen davon aus, daß dieser Luftgehalt im Mittel bei 15 l/m<sup>3</sup> (1,5 Vol.-%) liegt. Für 93 Betonmischungen, die in anderem Zusammenhang im Laboratorium hergestellt worden waren, lag der Luftgehalt zwischen 0,6 % und 2,6 %, im Mittel bei 1,5 %. Dazu wird untersucht, ob signifikante Abhängigkeiten des Luftgehalts von bestimmten Eigenschaften der Betonzusammensetzung bestehen.*

## 1. Allgemeines

Beim Entwurf von Betonmischungen (Stoffraumrechnung) wird im allgemeinen ein mittlerer Luftporengehalt von 15 l/m<sup>3</sup> (1,5 Vol.-%) angesetzt [1, S. 78]. Dieser Richtwert wird von Messungen im allgemeinen bestätigt; hiervon abweichend fanden sich auch kleinere und größere Luftporengehalte. Die nachträgliche rechnerische Ermittlung des Luftporengehalts in 1 m<sup>3</sup> des verdichteten Betons aus den Stoffmengen und den Rohdichten der Stoffe ist weitgehend von der mehr oder weniger genau bestimmten Rohdichte der Stoffe abhängig. Die so errechneten und die gemessenen Luftporengehalte stimmen selten ausreichend überein.

Es soll versucht werden, durch Auswerten von Versuchsergebnissen an Betonmischungen, die in anderem Zusammenhang hergestellt worden sind, weitere Aufschlüsse zu erhalten. Insbesondere soll der Einfluß der Betonzusammensetzung auf den Luftporengehalt qualitativ und möglichst auch quantitativ erfaßt werden. Man muß allerdings von vornherein dabei beachten, daß der Luftporengehalt wesentlich auch von der nicht genau festgelegten Verdichtungseinwirkung abhängig ist, die bei den verschiedenen Betonen für die „praktisch vollständige Verdichtung“ angewandt wurde.

## 2. Unterlagen

In die Auswertung wurden 93 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf hergestellte Betone einbezogen. Es wurden jeweils die Mischungen ausgewählt, die entsprechend der neuen DIN 1045 zusammengesetzt worden waren, d. h. mit Zementen nach DIN 1164 (Ausgabe 1970) und den neuen Sieblinien. Die Mischungen enthielten keine Zusatzmittel. Der Luftporengehalt wurde nach dem Druckausgleichsverfahren im Meßtopf bestimmt.

Zu jedem Beton waren folgende Werte bekannt:  
 Festigkeitsklasse des Zements, Sieblinie des Zuschlaggemisches,  
 Zementgehalt je m<sup>3</sup>, Zuschlaggehalt je m<sup>3</sup>, Wassergehalt je m<sup>3</sup>,  
 Verdichtungsmaß, Frischbetonrohddichte und Luftporengehalt.

Die Zemente gehörten den Festigkeitsklassen Z 350 L und F,  
 Z 450 L und F sowie Z 550 an. Die Sieblinien der Zuschlagge-  
 mische lagen im wesentlichen in den Bereichen A/B 16 und A/B  
 32 bis B/C 32. Die Zementgehalte bewegten sich zwischen rd.  
 260 und rd. 415 kg/m<sup>3</sup>, die Mehlkorngelhalte (Zement + Zuschlag  
 bis 0,25 mm) zwischen rd. 360 und rd. 600 kg/m<sup>3</sup>, die Wasser-  
 gehalte zwischen rd. 145 und rd. 200 l/m<sup>3</sup>. Die drei Konsistenz-  
 bereiche K 1, K 2 und K 3 waren in etwa gleich stark vertreten  
 ( $v = 1,00$  bis 1,55). In Tafel 1 sind in den Spalten 1 bis 3 diese  
 Größen und ein Teil der zusätzlich dazu noch untersuchten Ein-  
 flußgrößen aufgeführt. Einige weitere mögliche Einflußgrößen, wie  
 z. B. einzelne Siebdurchgänge, wurden nur anfangs bei der Aus-  
 wertung benutzt. Es zeigte sich, daß sie untereinander und mit

Tafel 1 Zusammenstellung der Einflußgrößen und deren statisti-  
 sche Kenngrößen für 93 Betonmischungen

1	2	3	4	5	6
Einflußgröße	Kurzzeichen	Dimension	Mittelwert	Standard- abweichung	Korrelation mit Luftporengehalt
Zementgehalt	Z	kg/m <sup>3</sup>	328	41	— 0,31
	Z <sup>2</sup>	—	—	—	— 0,33
Zuschlaggehalt	G	kg/m <sup>3</sup>	1871	70	0,45
Wassergehalt	W	kg/m <sup>3</sup>	171	15	— 0,47
Wasserzementwert	W/Z	—	0,52	0,05	≈ 0
Mehlkorngelhalt	M	kg/m <sup>3</sup>	465	52	≈ 0
	M <sup>2</sup>	—	—	—	≈ 0
Feinmörtelgehalt (< 0,25 mm)	G <sub>Fm</sub>	kg/m <sup>3</sup>	634	63	≈ 0
Feinmörtelvolumen	V <sub>Fm</sub>	l/m <sup>3</sup>	327	30	≈ 0
Feinmörtelrohddichte	ρ <sub>Fm</sub>	kg/dm <sup>3</sup>	1,94	0,04	0,39
Körnungsziffer	k	—	4,31	0,40	— 0,45
F-Wert	F	—	153	9	— 0,41
spez. Oberfläche	O	m <sup>2</sup> /kg	243	53	0,44
Zuschlaggehalt bis 0,25 mm	G <sub>0,25</sub>	kg/m <sup>3</sup>	130	37	0,49
Zuschlaggehalt bis 0,5 mm	G <sub>0,5</sub>	kg/m <sup>3</sup>	295	70	0,51
Zuschlaggehalt bis 1 mm	G <sub>1</sub>	kg/m <sup>3</sup>	454	106	0,53
Zuschlaggehalt bis 2 mm	G <sub>2</sub>	kg/m <sup>3</sup>	620	117	0,55
Zuschlaggehalt bis 4 mm	G <sub>4</sub>	kg/m <sup>3</sup>	817	126	0,58
Zuschlaggehalt bis 8 mm	G <sub>8</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1121	139	0,57
Zuschlaggehalt bis 16 mm	G <sub>16</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1520	177	0,41
mod. Zuschlaggehalt	G/k	kg/m <sup>3</sup>	440	35	0,60
Verdichtungsmaß	v	—	1,25	0,13	0,45
	v <sup>2</sup>	—	—	—	0,32
rechn. Luftporengehalt	LP <sub>R</sub>	l/m <sup>3</sup>	— 2,9	20,4	≈ 0
Luftporengehalt (gemessen)	LP	l/m <sup>3</sup>	14,7	4,9	1,00

den anderen Einflußgrößen mit rd. 0,95 so gut korrelierten, daß sie mit diesen erfaßt wurden.

### 3. Auswertungen

Die Auswertungen erfolgten unter Zuhilfenahme der Programme BMD 02R [2] für schrittweise multiple lineare Regression und BMD 05D [2] für das Aufstellen von Diagrammen auf einer Großrechenanlage.

#### 3.1 Kenngrößen zum Luftporengehalt

Für die 93 Mischungen wurden folgende Werte ermittelt:

Kleinster Wert	6 l/m <sup>3</sup> (0,6 %),
Größter Wert	26 l/m <sup>3</sup> (2,6 %),
Mittelwert	14,7 l/m <sup>3</sup> (1,5 %),
Standardabweichung	4,9 l/m <sup>3</sup> (0,5 %).

Der errechnete Mittelwert bestätigt die bei der Stoffraumrechnung übliche Annahme eines mittleren Luftporengehaltes von 15 l/m<sup>3</sup> (1,5 %) im „praktisch vollständig verdichteten“ Normalbeton.

#### 3.2 Korrelationen

Die Tafel 1 enthält in der Spalte 6 die errechneten Korrelationsmaße der gewählten Einflußgrößen mit dem Luftporengehalt. Es fällt nach dieser Spalte auf, daß keine der untersuchten Einflußgrößen eine zufriedenstellende Korrelation mit dem Luftporengehalt aufweist. Dies wäre erst dann der Fall, wenn die Größe des Korrelationsmaßes im Bereich von über etwa 0,8 liegen würde.

Eine Überprüfung der hier nicht wiedergegebenen Korrelationsmatrix, die die Korrelationsmaße aller in die Untersuchung einbezogenen Größen untereinander angibt, zeigte, daß keine nennenswerten ungewollten Abhängigkeiten im benutzten Datenmaterial vorlagen. Daher ist nicht zu erwarten, daß durch Einbeziehung weiterer Versuchsergebnisse in die Auswertung wesentlich andere Ergebnisse gewonnen worden wären.

#### 3.3 Darstellung in Diagrammen

Aus verschiedenen hier nicht wiedergegebenen Diagrammen, in denen der Luftporengehalt über den einzelnen Einflußgrößen aufgetragen war, wurden die in Tafel 2 aufgeführten Bereiche für besonders hohe (> 2 %) bzw. niedrige (< 1 %) Luftporengehalte abgeschätzt. Wenn wenigstens zwei der in dieser Tafel genannten Bereiche für einen Beton zutreffen, so ist mit einem darüber bzw. darunter liegenden Luftporengehalt zu rechnen. *Die Erfüllung einer einzelnen Bedingung läßt noch keinen Schluß auf den Luftporengehalt zu.* Zum Beispiel wird ersichtlich, daß geringe Zement- und Wassergehalte verbunden mit einem sandreichen Zuschlaggemisch hohe Luftporengehalte bewirken und grobe Zuschlaggemische bei reichlichem Wassergehalt praktisch unabhängig vom Zement- oder Feinmörtelgehalt zu kleinen Luftporen-

Tafel 2 Bereiche für verschiedene Einflußgrößen, bei denen besonders niedrige bzw. hohe Luftporengehalte möglich sind, sofern mehrere dieser Bereiche für einen Beton zutreffen

Einflußgröße	Kurzzeichen	Dimension	Bereiche für Luftporengehalte	
			$\leq 10 \text{ l/m}^3$ (1 ‰)	$\geq 20 \text{ l/m}^3$ (2 ‰)
Zementgehalt	Z	kg/m <sup>3</sup>	—*)	< 300
Wassergehalt	W	kg/m <sup>3</sup>	> 165	< 165
Zuschlaggehalt	G	kg/m <sup>3</sup>	—*)	> 1900
Feinmörtelvolumen	V <sub>Fm</sub>	l/m <sup>3</sup>	—*)	< 310
Zuschlaggehalt bis 4 mm (Sand)	G <sub>4</sub>	kg/m <sup>3</sup>	< 900	> 850
Körnungsziffer	k	—	> 4,2 (grob)	< 4,5 (fein)
Verdichtungsmaß mod. Zuschlaggehalt	v G/k	— kg/m <sup>3</sup>	< 1,20 < 450	> 1,20 > 450

\*) Luftporengehalte  $< 10 \text{ l/m}^3$  waren praktisch bei allen Zement-, Zuschlag- und Mörtelgehalten vorhanden

gehalten führen. Die Konsistenz hängt direkt vom Wassergehalt und der Kornzusammensetzung ab und ist so kein eigenes Merkmal. Das Verhältnis Zuschlaggehalt zu Körnungsziffer kann als ein mit der Kornverteilung „modifizierter“ Zuschlaggehalt angesehen werden. Dieser Wert wurde hier aufgenommen, weil er die beste Korrelation einer Einzelgröße mit dem Luftporengehalt aufwies.

### 3.4 Regressionen

Die durchgeführten Regressionen erreichten bestenfalls ein Bestimmtheitsmaß B von rd. 80 ‰, selbst wenn bis zu 12 Einflußgrößen in eine Gleichung einbezogen wurden. (Das Bestimmtheitsmaß B einer Regressionsrechnung entspricht rechnerisch dem Quadrat des Korrelationsmaßes r einer Korrelationsrechnung.) Die Standardabweichung der Reststreuung für den Luftgehalt betrug in diesen Fällen rd.  $2,2 \text{ l/m}^3$  (0,2 ‰) und lag damit im Bereich der Meßgenauigkeit. Allerdings sind die so errechneten, sehr komplizierten Beziehungen nur von geringer praktischer Bedeutung. Im folgenden werden als Beispiele drei der einfacheren Regressionsgleichungen, die je zwei Mischungsparameter berücksichtigen, und deren Bestimmtheitsmaß B sowie Standardabweichung s angegeben.

$$\text{LP} = 21,8 - 0,156 \cdot W + 0,022 \cdot G_4; \quad B = 59 \text{ ‰}, \quad s = 3,1 \text{ l/m}^3 \quad (1)$$

$$\text{LP} = 129 - 0,165 \cdot V_{Fm} - 14,05 \cdot k; \quad B = 61 \text{ ‰}, \quad s = 3,1 \text{ l/m}^3 \quad (2)$$

$$\text{LP} = 94,7 - 0,249 \cdot W - 8,79 \cdot k; \quad B = 63 \text{ ‰}, \quad s = 3,0 \text{ l/m}^3 \quad (3)$$

Es bedeuten:

LP = Luftporengehalt des Frischbetons, gemessen im Drucktopf in  $\text{l/m}^3$ ,

- W = Wassergehalt in  $l/m^3$ ,
- k = Körnungsziffer der Sieblinie des Zuschlaggemisches,
- $V_{Fm}$  = Volumen des Feinmörtels (Zement + Zuschlag bis 0,25 mm + Wasser) in  $l/m^3$ ,
- $G_4$  = Zuschlag bis 4 mm in  $kg/m^3$  (Sandgehalt),
- B = Bestimmtheitsmaß in  $\%$ ,
- s = Standardabweichung der Reststreuung des Luftporengehalts in  $l/m^3$ .

In Bild 1 sind für die untersuchten Mischungen die Luftporengehalte über den Sandgehalten aufgetragen. Die ebenfalls eingezeichneten Geraden entsprechen der Beziehung (1), wobei für den Wassergehalt 140, 170 bzw. 200  $l/m^3$  eingesetzt wurden.

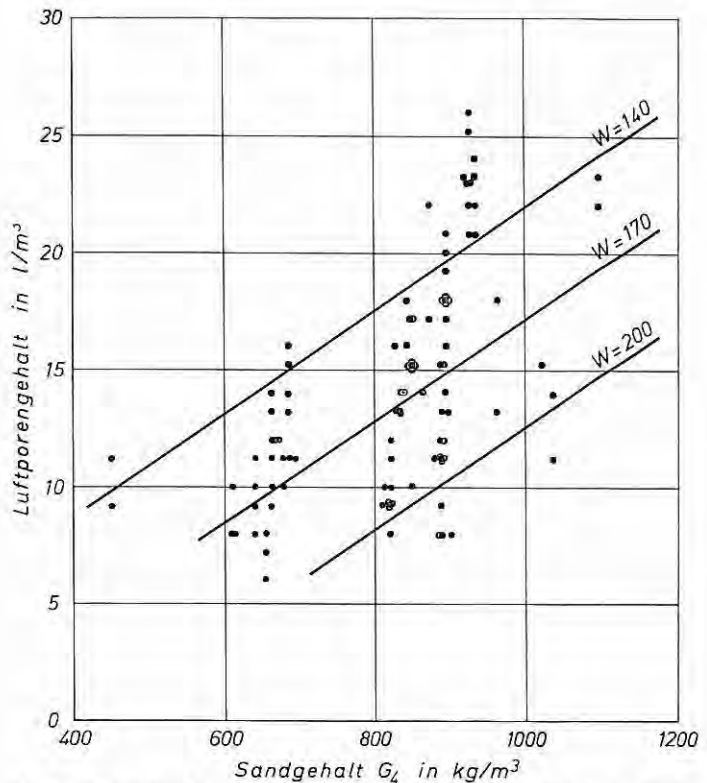


Bild 1 Luftporengehalt üblich zusammengesetzter Normalbetone in Abhängigkeit vom Sandgehalt. Die Geraden entsprechen der Gleichung  $LP = 21,8 - 0,156 \cdot W + 0,022 \cdot G_4$  für  $W = 140, 170$  und  $200 l/m^3$  (LP = gemessener Luftporengehalt in  $l/m^3$ ;  $G_4$  = Gehalt an Sand 0/4 mm in  $kg/m^3$ ;  $W$  = Wassergehalt in  $l/m^3$ )

#### 4. Zusammenfassung

Bei der Auswertung des Einflusses der Zusammensetzung und der Frischbetoneigenschaften von 93 Laborbetonen konnte keine brauchbare Abhängigkeit des im Drucktopf gemessenen Luftporengehalts von einer einzelnen der untersuchten Einflußgrößen der Betonmischungen nachgewiesen werden. Erst bei Berücksichtigung von mindestens zwei Einflußgrößen war es möglich, zuverlässigere Schätzwerte für die Größe des Luftporengehalts zu ermitteln. Der nach [1, S. 78] vorzusehende mittlere Luftporengehalt von  $15 \text{ l/m}^3$  im Beton (1,5 %) für die Stoffraumrechnung wurde bestätigt.

Der über die nachträgliche Stoffraumrechnung ermittelte Luftporengehalt gestattet keine zuverlässige Aussage über den tatsächlichen Luftporengehalt. Die nachträgliche Errechnung der Zusammensetzung des verdichteten Betons sollte daher unter Berücksichtigung des gemessenen Luftporengehalts durchgeführt werden.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. 2. Auflage. Beton-Verlag, Düsseldorf 1973.
- [2] Dixon, W. J.: BMD — Biomedical computer programs. University of California Press, Berkeley and Los Angeles 1968.