

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 70 (1952)
Heft: 1

Artikel: Luftporenbeton
Autor: Ammann, Alfons
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-59535>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

haben die Form von Stahlkugeln, wie aus Bild 19 ersichtlich ist. Mittels eines Lotes wurden die beiden Kugeln, deren eine in einem Langloch des sie tragenden Flacheisens befestigt ist, genau senkrecht übereinander gerichtet (Bild 18). Die dritte Dreiecksecke ist am sich setzenden Gebäudeteil befestigt. Die gegenseitige Bewegung der Kugeln wurde mit einem Mikrometer mit Anschlagwinkel auf 1/100 mm genau gemessen (Bild 20). Die Umrechnung der Dreiecksverschiebungen erfolgte mit Hilfe der Winkelfunktionen.

Im Zeitpunkt der Montage der Messstellen waren die beiden Kellergeschosse im Rohbau fertig gestellt. Die Montage der Messtellen und das exakte Einmessen ihrer Anfangslage erfolgte einige Wochen vor dem Beginn der Sandfüllung. Während dieser Zeit wurde der Belastungszustand nicht geändert, so dass die folgenden Ablesungen nur von den Temperaturänderungen beeinflusst waren. Diese Messungen lieferten sehr erwünschte Anhaltspunkte über den Einfluss der Temperaturschwankungen auf die vertikale Verschiebung. Voraussetzung für die Messung der Setzungen war die Annahme, dass das Gebäude 1 in vertikaler Richtung unbeweglich sei. Dies konnte bei den Messtellen am nicht vorbelasteten Teil des Gebäudes 2 ebenfalls angenommen werden, da dieser auf ausgezeichnetem Baugrund steht und deshalb nur sehr minimale Setzungen aufweist.

Vor Beginn der Sandfüllung wurde die unterste Kellerdecke gespriesst, um wenn nötig auch im 1. Keller die Füllung fortsetzen zu können. Diese Massnahme erwies sich jedoch als überflüssig, denn die grösste Setzung, die sich nach Füllung des 2. Kellers ergab (rd. 65 % der Gesamtlast), betrug nur 4 mm, so dass mit dem Aufbau begonnen werden konnte. Die Messungen, welche bis zur Fertigstellung des Rohbaues (rd. 90 % der Gesamtlast) regelmässig weitergeführt wurden, ermöglichen eine ständige Kontrolle der Bewegungen.

Die graphisch aufgetragenen Setzungen zeigten, dass auch nach der Setzung die vier Gebäudecken auf einer Ebene liegen, was infolge der Starrheit des Baukörpers in den beiden Kellern zu erwarten war. Nach Fertigstellung des Gebäudes betrug die grösste Setzung rd. 5 mm. Die Messungen, welche in grösseren Abständen weiter durchgeführt wurden, ergaben keine nennenswerte Setzung mehr und zeigen eine gute, sinngemäss Uebereinstimmung der vertikalen und horizontalen Bewegungen mit dem Temperaturverlauf.

Der Anschluss an den nicht vorbelasteten Teil des Gebäudes 2 wurde so ausgebildet, dass die Brüstungsträger in jedem Stockwerk als einfache Balken von 1,80 m Länge auf Stahl-

lagern gelagert wurden, also einerseits gelenkig, andererseits auch horizontal beweglich. Dadurch hat man jede sichtbare Auswirkung einer allfälligen weiteren Setzung in den Fassaden vermieden.

Nachdem das Bauwerk nun seit 1½ Jahren im Betrieb steht, zeigt sich, dass die Fugenanordnung und nicht zuletzt auch die starken Schwindarmierungen, welche die

Rissebildungen infolge Temperaturschwankungen und Schwinden weitgehend vermieden, im Interesse einer Schonung der feingliedrigen Struktur der Fassaden gerechtfertigt waren.

A. L. Légeret

Bild 21. Südwestfassade des Hauses 3, von der Rue de Genève gesehen



S. b. 2

Luftporenbeton

Von Dr. ALFONS AMMANN, Dipl. Ing.-Chem., Zürich-Höngg¹⁾

Vor etwa 20 Jahren wurde in den USA die Beobachtung gemacht, dass ein bestimmtes Stück einer Betonstrasse die sonst auftretenden Frostschäden, die sich hauptsächlich in Form von oberflächlichen Abplatzungen zeigten, nicht aufwies. Untersuchungen ergaben, dass der Beton dieses Strassenstückes mit zahlreichen kleinen Luftporen durchsetzt war. Die Luftporenentwicklung soll durch eine bestimmte Partie Zement, in welche durch ein fehlerhaftes Lager während des Mahlprozesses Schmieröl eingedrungen war, verursacht worden sein. Diese unbeabsichtigte Einführung von Luftporen in den Strassenbeton, zusammen mit der Beobachtung der

DK 666.974.191

erhöhten Frostbeständigkeit, hat den Anlass zu einer Betontechnik gegeben, welche die Ingenieure stark beschäftigt²⁾. Es ist die Technik des «air entrained concrete» — Beton mit eingeführter Luft. Der Einfachheit halber wird in den weiteren Ausführungen dieser Beton mit «Luftporenbeton» bezeichnet, den ich wie folgt definieren möchte: Luftporenbeton ist ein normaler Schwerbeton, der 3 bis 5 % Luftporen, deren Durchmesser höchstens 0,5 mm beträgt, enthält, die gleichmäßig im Mörtel des Betons verteilt sind.

Nach den schlechten Erfahrungen, die man mit dem Gussbeton der zwanziger Jahre gemacht hat, insbesondere was Wasserdichtigkeit, Frostbeständigkeit, Wetterbeständigkeit

¹⁾ Vortrag, gehalten am Betontag des Oesterr. Betonvereins am 8. März 1950 in Wien. Die Versuche wurden im Laboratorium der Firma Kasp. Winkler & Co. in Zürich ausgeführt.

²⁾ Siehe die bezügl. Veröffentlichungen in SBZ 1947, S. 390, 450, 493; 1948, S. 85, 213, 402; 1949, S. 354, 634; 1950, S. 81, 294*, 368*, 468, 559.

und Widerstandsfähigkeit gegen weiche Wässer anbetrifft, ist man immer mehr dazu übergegangen, einen Beton mit möglichst kleinem Wasserzusatz herzustellen. Es ergab dies naturgemäß Betone, die nur durch intensive Verdichtungsarbeit verarbeitet werden konnten. Die heute allgemein eingeführte Verarbeitung des Betons durch Vibration hat erst die Anwendung dieser verhältnismässig trockenen Betone ermöglicht. Die zur Herstellung eines frost- und witterungsbeständigen Betons bis heute geltenden Grundsätze bestanden darin, durch mittlere Zementdosierung, Zuschlagstoffe von bestimmter Qualität und Granulation, möglichst tiefen Wasserzementwert und intensive Verdichtung zu einem Fertigbeton von grösster Dichte zu gelangen. Die Dichte eines Betons wurde sozusagen als Mass für seine Güte betrachtet. Die neue Betontechnik der Herstellung eines frostbeständigen Betons durch Einführung einer bestimmten Menge Luftporen von bestimmter Grösse steht scheinbar den heute bewährten Grundsätzen diametral gegenüber, indem dadurch die Dichte des Betons herabgesetzt wird. Die nach den bisherigen Grundsätzen hergestellten Fertigbetone weisen aber mechanische Eigenschaften auf, die in den allerwenigsten Fällen voll ausgenützt und beansprucht werden. Daher ist dieser «Rückschritt» zur Anwendung leichter verarbeitbarer Betone mit eigentlich unvollkommenen Verdichtung in gewissem Grade zu verantworten. Nichtsdestoweniger behalten aber die bewährten Grundsätze der Betonherstellung ihren Wert unter Beachtung der Bedingung, dass eben Luft, welche in ebenso bestimmter Menge und Verteilung, wie z. B. Kies und Sand, vorhanden sein soll, als eine weitere Komponente des Betons zu betrachten ist.

Heute liegen nun bereits mehr als zehnjährige Erfahrungen mit der Technik des Luftporenbetons vor, insbesondere aus Schweden³⁾, wo schon 1937 die Erhöhung eines Staumauer mit dieser Betonart erfolgte, und zwar wurde in erster Linie zur Technik der Luft einföhrung gegriffen, um die Verarbeitbarkeit des sehr harschen Betons zu verbessern, dann aber aus den USA, wo man 1938 mit dem Bau von Strassen und Flugpisten begann, die zeigen, dass der Luftporenbeton eine überlegene Frost- u. Witterungsbeständigkeit besitzt. Der Luftporenbeton hat den weiteren Vorteil, dass er in plastischer Konsistenz und daher maschinell und mit geringeren Kosten verarbeitet werden kann. Luftporenbeton ist zusammenhaltender, leichter verarbeitbar, und es können auch mit bescheiden dosierten Mischungen Fertigbetone hergestellt werden, die witterungs- und frostbeständig sind. Seine technischen wie wirtschaftlichen Vorteile haben den Luftporenbeton in den USA heute zu der am meisten verwendeten Betonart gemacht. Es wird behauptet, dass dort 80 % allen hergestellten Betons Luftporenbeton sei.

³⁾ G. S. Lal in, 3. Kongress für Grosse Staumauern, Stockholm 1948, Report Nr. 59: Admixtures for the Purpose of improving the Workability of Concrete.



Bild 1. Beton ohne Luftporen

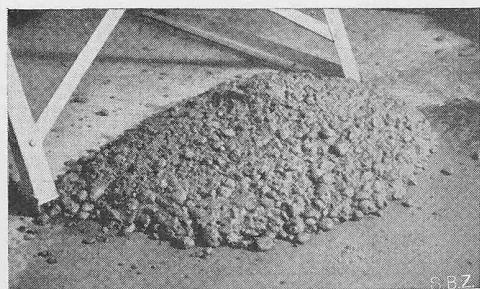


Bild 2. Beton mit Luftporen

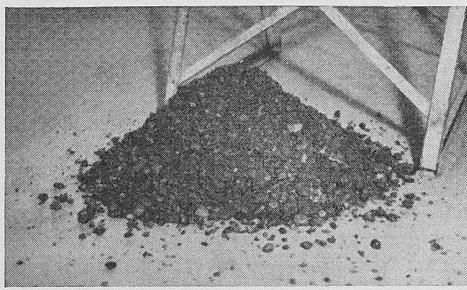


Bild 3. Kies-Sand ohne Luftporen

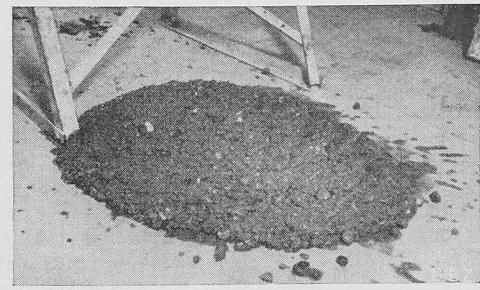


Bild 4. Kies-Sand mit Luftporen

Die Bilder 1 bis 4 veranschaulichen am besten die Wirkung der Einföhrung von feinen Luftporen in Beton. Bild 1 stellt eine Betonmischung mit einer Zementdosierung von 250 kg/m³ und einem W/PC von 0,55 von erdfreudiger Konsistenz dar, wie er aus der Mischmaschine fällt. Der Beton ist ein lockerer Haufen, wobei sich das grössere Zuschlagskorn vom Betonhaufen trennt und abrollt. Führt man nun in diesen Beton Luftporen der beschriebenen Art ein, indem man den gleichen Beton wieder in die Mischmaschine gibt, nichts anderes als den Luftporenzusatz zugibt und nochmals mischt, so erhält man einen gussfähigen, wie ein Brei zusammenhaltenden Beton, der keine Trennung des Zuschlages zeigt (Bild 2).

Den selben Versuch kann man auch nur mit dem Zuschlagsmaterial allein ausführen. Die Bilder 3 und 4 zeigen eine Zuschlagsmischung gleicher Granulation wie beim Beton der Bilder 1 und 2 mit 7 % Wasser. Durch die Einföhrung der Luft erhält man aus dem Sandkies-Wasser-Gemisch eine Mischung, die sich nach dem Aussehen kaum von einem Beton unterscheidet. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die Luftporenmengen bei den Versuchen rd. 10 % betragen.

Bild 5 zeigt in 100facher Vergrösserung die Luftporen in Mörtel 1:6 mit Sand von 0,1 bis 1 mm. Es ist zu verstehen, dass diese Luftpölster einen harschen Beton besser verarbeitbar machen können. Die Einföhrung von Luftporen wirkt sich daher auch am günstigsten auf magere Betone oder solche von schwieriger Verarbeitbarkeit aus. (Die letzteren ist oft dem Mangel an Sand oder der rauen Oberfläche des Zuschlagsmaterials zuzuschreiben.) Im erhärteten Beton oder Mörtel sind nun diese Luftporen ein Bestandteil desselben wie z. B. der Zuschlag, welcher im Zementstein eingebettet und in ihm gleichmässig verteilt ist.

Um das Wesen des Luftporenbetons besser verstehen zu können, ist es notwendig, seine innere Struktur näher zu betrachten. Wir haben im Festbeton die kompakte, in der Hauptsache porenfreie Masse des Zuschlages, bestehend aus Kies und Sand, eingebettet in den Zementstein, der immer von Poren durchsetzt ist, und zwar können wir drei Porenarten unterscheiden: Kapillarporen, Luftporen, Wasserporen.

Mengenmässig am grössten, aber von so feiner Beschaffenheit, dass sie unsichtbar bleiben, sind die Kapillarporen vorhanden. Die Kapillarporen sind kreuz und quer miteinander verbunden und bilden das Kanalsystem im Beton, in dem die Wasserbewegungen stattfinden können.

Luftporen. Bei der Herstellung des Betons wird stets Luft in kleinen Blasen eingeföhrt. Durch die heftige Bewegung der Betonanteile während des Mischprozesses in der Betonmaschine bildet sich eine Emulsion von Luft in Wasser. Da die Oberflächenspannung des Wassers aber sehr gross ist, sind diese Luftblasen nicht beständig, sie vereinigen sich leicht zu grösseren Blasen und entweichen bei der

Verarbeitung des Betons je nach Konsistenz mehr oder weniger leicht. Die Luftporen stehen mit den Kapillarporen in Verbindung. Normaler, plastischer Beton kann je nach Dosierung 1 bis 3 % Luftporen enthalten, deren Durchmesser, im Unterschied zu den Poren des Luftporenbetons, meist 6 bis 10 mm beträgt.

Wasserporen sind grössere Ansammlungen von Wasser, die sich hauptsächlich bei der Abscheidung des Anmachwassers bilden. Sie können insbesondere bei grossem und plattigem Zuschlagskorn auf der Unterseite dieser Zuschläge auftreten. Sie verschlechtern die Frostbeständigkeit des Betons stark.

Die systematische Einföhrung von Luftporen in der Grösse von höchstens 0,5 mm Durchmesser in der Menge von 3 bis 5 %, was 30 bis 50 l/m³ Fertigbeton ausmacht, führt nun zu einer ganz anderen Organisation der Betonbestandteile und daher auch zu einer Umgestaltung der

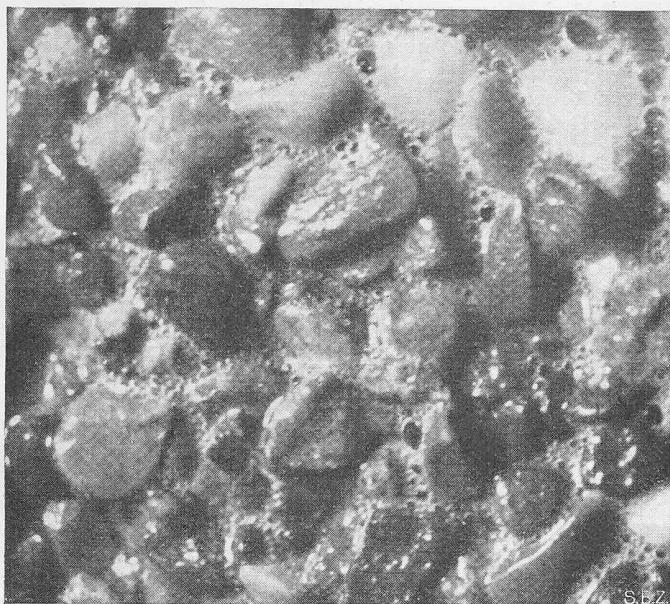


Bild 5. Frisch angemachter Luftporenbeton, Vergrösserung 1:100

Struktur des Festbetons. Je nach Dosierung, Granulation und Plastizität eines Betons sind zu seiner Herstellung 40 bis 80 % des Zementgewichtes an Anmachwasser notwendig. Für die Erhärtung des Zementes werden aber maximal nur 20 % Wasser chemisch gebunden. Alles Wasser über diese Menge hinaus, für einen gebräuchlichen Beton also 100 bis 300 % des für die chemische Reaktion notwendigen Wassers, welches aber für Herstellen und Einbringen des Betons notwendig ist, verbleibt im Beton und erzeugt infolge seines Vorhandenseins ein unendlich feines Kapillarporen-System. Die Feinheit und die Menge der Kapillarporen hängt natürlich von der Menge des überschüssigen Anmachwassers ab. Nach Untersuchungen im Jahre 1946⁴⁾ ergeben Zemente oder Betone mit einem Wasserzementwert bis 0,44, also bei 44 % Wasser, auf den Zement bezogen, in der Hauptsache Gelporen der Ca- und Al-Silikate, die Durchmesser von 20 bis 40 Angström, also 20 bis 40×10^{-8} cm oder 2 bis 4 μ besitzen. Bei höherem Wasserzementwert bilden sich im Zementstein des Betons Kapillarporen von grösserem Durchmesser. Eigene Untersuchungen mit Hilfe der Absorptionsgeschwindigkeit schätzungsweise berechnet, ergeben, je nach Anmachwassermenge, mittlere Kapillarporen-Durchmesser von 200 bis 5000 Angström oder 20 bis 500 μ .

Das durch das Ueberschusswasser gebildete Kapillar-

4) T. C. Powers und T. L. Brownard, Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, «Journal of the American Concrete Institute». Vol. 18 (1946), 101, 249, 469, 549, 669, 845, 933.

Tabelle 1

A	B	C	D	E	F	G	H
150	48,4	180	1,20	30	78,4	150	1,92
200	64,5	180	0,90	40	104,5	140	1,34
250	80,6	180	0,72	50	130,6	130	0,99
300	96,8	180	0,60	60	156,8	120	0,77
350	112,9	180	0,51	70	182,9	110	0,60
400	129,0	180	0,45	80	209,0	100	0,48
450	145,0	180	0,40	90	235,0	90	0,38
500	161,1	180	0,36	100	261,1	80	0,31

A Zement pro m³ Beton in kg

B Zement pro m³ Beton in l (Abs. Vol. spez. Gew. = 3,1)

C Anmachwasser in l pro m³ Beton

D Wasserzementfaktor W/PC

E Wasser chemisch mit dem Zement gebunden in l/m³ Beton

F Totalvolumen Festprodukt aus Zement und Wasser in l/m³ Beton, F = B + E

G Freies, Kapillarporen erzeugendes Wasser in l/m³ Beton, G = C - E

H Verhältnis Kapillarporenvolumen: Festproduktvolumen, H = G:F

Poresystem, welches einen ganz wesentlichen Anteil des Betonvolumens ausmacht, hat die Eigenschaft, dass es sich nach der Verdunstung des Anmachwassers sofort unter Verdrängung der Luft wieder mit Wasser füllt, wenn es mit solchem in Berührung kommt. Der Wasseraustausch, die Wasseraufnahme und -abgabe, die Durchtränkung, die Wasserdichtigkeit eines Betons und dadurch auch jede chemische wie physikalische Einwirkung auf den Beton, bei der Wasser beteiligt ist, hängen zur Hauptsache von diesem Kapillarporesystem ab. Tabelle 1 gibt einen Ueberblick über dieses Porenvolume bei Annahme, dass Wasser in der Menge von 20 % des Portlandzement-Gewichtes chemisch gebunden wird; sie ist berechnet für Beton verschiedener Dosierung mit konstanter Anmachwassermenge von 180 l/m³ Beton. Diese Anmachwassermenge entspricht etwa einer erdfeuchten bis plastischen Betonkonsistenz.

Tabelle 1 zeigt, dass das durch das Ueberschusswasser erzeugte Kapillarporenvolume an obigen Beispielen 8 bis 15 % des Totalbetonvolumens, also 80 bis 150 l/m³ ausmacht. Aus Kolonne H ist weiter zu entnehmen, dass bei den mageren Dosierungen (150 kg bzw. 200 kg) das Kapillarporenvolume 1,9- bzw. 1,3mal grösser ist als das Volumen des aus dem Zement und Wasser gebildeten Festprodukts. Dies ist auch der Grund, warum Wasserdurchlässigkeit und Frostempfindlichkeit bei Magerbeton verhältnismässig gross sind. Bei der Dosierung 250 kg sind Kapillarporen und Festproduktvolumenmässig gleich, und erst bei höheren Dosierungen nimmt das Kapillarporenvolume einen kleineren Raum ein.

Dies zeigt deutlich, wie gross und vorteilhaft die Wirkung einer Verminderung der Anmachwassermenge besonders auf das Mass des Kapillarporenvolumens und damit auf die Frostbeständigkeit, sowie auf die meisten wichtigen Betoneigenschaften ist. Eine Uebersicht über diese Wirkung, die man z. B. durch plastifizierende Zusätze erreichen kann, veranschaulicht Tabelle 2. Die Verminderung des Kapillarporenvolumens beträgt z. B. bei einem Beton mit einem Zementgehalt von 250 kg/m³ 13,8 % bzw. 20,8 % des gesamten durch das Wasser erzeugten Porenraumes, wenn 10 bzw. 15 % des Anmachwassers eingespart werden können.

Obige Ueberlegungen geben auch eine Erklärung für das Abramsche Wasserkementfaktor-Festigkeitsgesetz. Der Festigkeitsabfall in einem Beton mit Zunahme der Anmachwassermenge ist eine Folge der zunehmenden Porosität im erhärteten Beton. Es wird dadurch auch verständlich, warum bei Verwendung von plastifizierenden Zusätzen nicht nur die Anfangs- (bis 28 Tage-), sondern auch die Endfestigkeiten grösser sind und es auch bleiben, indem eben die Festigkeitsverbesserungen in der Hauptsache auf eine Verminderung des Kapillarporenvolumens und damit auf die Bildung einer dichteren Struktur zurückzuführen sind⁵⁾ ⁶⁾.

5) M. Ross, EMPA-Bericht Nr. 144; Einfluss des Zusatzes von Plastimix auf die bautechnischen Eigenschaften des Betons.

6) Otto Graf, Die Eigenschaften des Betons, Seiten 233 bis 237; Berlin 1950, Springer-Verlag.

Tabelle 2 (Kolonnen A bis H siehe Tabelle 1)

I	K	L	M	N	O	P
150	132	123	1,68	1,57	12	18
200	122	113	1,17	1,08	12,8	19,3
250	112,6	103	0,86	0,79	13,8	20,8
300	102	93	0,65	0,59	15,0	22,5
350	92	83	0,50	0,45	16,4	24,5
400	82	73	0,39	0,35	18,0	27,0
450	72	63	0,31	0,27	20,0	30,0
500	62	53	0,24	0,20	22,5	33,8

I Zement pro m³ Beton in kg

K Freies, Kapillarporen erzeugendes Wasser bei einer Anmachwasserverminderung von 10 %, in l/m³ Beton, K = 0,9 (C - E)

L id. bei Anmachwasserverminderung von 15 %, L = 0,85 (C - E)

M Verhältnis Kapillarporenvolumen: Festproduktvolumen bei 10 % Anmachwasserverminderung, M = K:F

N id. bei 15 % Anmachwasserverminderung, N = L:F

O Verminderung des Kapillarporenraumes in % bei Anmachwasserverminderung von 10 %

P id. bei Anmachwasserverminderung von 15 %

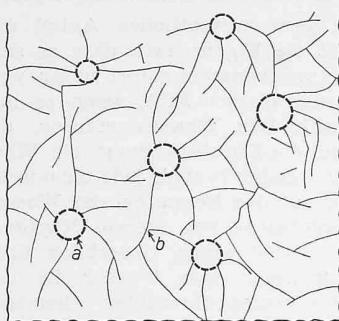


Bild 6. Struktur des Zementsteins im Luftporenbeton; a Luftporen, b Kapillarporen

einen Liter Luftporen eine Anzahl von $0,02$ bis $2,6 \times 10^9$ Luftporen errechnen lässt.

Die Aufnahme dieser Luftporen in den Beton erfolgt durch Bildung einer Luftpelusion in der Suspension von Wasser, Zement und Feinsand. Da der Mörtel, gebildet aus Wasser, Zement und Sand, z. B. bis zu 4 mm, nur 30 bis 35 Vol. % des Gesamtbetonvolumens ausmacht, erreicht der Luftporenanteil im Mörtel das Mehrfache seines auf das Gesamtbetonvolumen bezogenen Wertes von 3 bis 5 %, also etwa 10 bis 15 %. Diese Luftporen, welche ein entsprechendes Volumen Sand derselben Körnung ersetzen können, sind nun ein ideales Schmiermittel. Gemäss amerikanischem Auspruch wirken sie wie Kugellager. Durch die Verbesserung der Verarbeitbarkeit erlaubt die Luftpelusion eine Verminderung der Anmachwassermenge, allerdings nicht im Ausmaße der eingeführten Luftpelusion, da sich die Luftporen eben nur wie idealer Zuschlag (Feinsand), nicht aber wie Wasser verhalten.

Die Luftporen erfüllen im Frischbeton aber noch eine weitere Aufgabe; sie stabilisieren den Mörtel oder Beton, machen ihn zusammenhaltbarer, klebriger, und vermindern dadurch die Wasserabscheidung. Durch das Verhindern des Aufsteigens des Wassers im Beton und die daraus folgende Verhinderung der Bildung von weiteren schädlichen Kapillarporen wird auch die Ansammlung des abgeschiedenen Wassers an der Unterseite von flachen oder grösseren Zuschlagskörnern verhindert, also eine weitere Ursache der Frostunbeständigkeit ausgeschaltet. Im erhärteten Beton erfüllen die Luftporen hauptsächlich zwei Aufgaben: Sie vermindern einerseits die Saugfähigkeit und Wasseraufnahme des Betons und ermöglichen andererseits dem durch die Kapillaren aufgenommenen Wasser, sich beim Gefrieren um 9 % auszudehnen⁷⁾. Beim Gefrieren des Betons gefriert das Wasser, das sich in den Kapillaren befindet, zuerst aussen und schliesst so die Kapillaren ab. Bei weiterer Frosteinwirkung nimmt die Eisbildung nach innen zu, wobei das zu Eis gefrorene Wasser ein immer grösseres Volumen beansprucht. Es entsteht daher im Eis ein Druck, der den Beton auf Zug und Druck beansprucht. Uebersteigen diese Spannungen die Zugfestigkeit des Betons, so treten Schäden auf. Im Luftporenbeton hingegen werden die wasserführenden Poren immer wieder durch Luftporen unterbrochen. Da die Luft komprimierbar ist, stehen der Eisbildung die Luftporenholträume zur Verfügung, und es können daher gefährliche Spannungen weniger oder überhaupt nicht entstehen.

Die Einführung von Luftporen in dieser Menge in das Betongefüge bewirkt natürlich auch Nachteile. Nachteilig werden vor allem die Festigkeiten, die Haftfestigkeit an Eiseneinlagen und das Raumgewicht beeinflusst. Der Abfall der Festigkeiten kann bei Ausnutzung der Anmachwasser-Verminderung bei einer Luftpelusion von 3 bis 5 % bis zu 20 % erreichen, da die mögliche Anmachwasser-Verminderung teilweise zu gering ist, um den Abfall durch den Luftporen-einschluss zu kompensieren.

Die amerikanischen und unsere Untersuchungen bestätigen, dass für Magerbetone durch die Luftpelusion einflussreicher ist.

7) Dr. A. Ammann, «Sika-Nachrichten» Nr. 22, 1947: Ueber die Herstellung von frostbeständigem Beton unter Verwendung von Frioplast.

8) Stanton Walker und Delmor L. Blome, «Journal of the American Concrete Institute» 17, 636 (1946), Heft Juni, Nr. 6. J. F. Barbes: Was haben wir vom Luftporenbeton gelernt. ibid 20, 601 (1949), Heft April, Nr. 6.

Der feinkapillare Zementstein des Betons wird nun im Luftpelusion-beton von zahlreichen Luftporen durchsetzt, die mit den Kapillarporen in Verbindung stehen. Die Durchmesser der Luftporen sind mit etwa 0,1 bis 0,5 mm schätzungsweise 1000 bis 10 000 mal grösser als die der Kapillarporen (Bild 6). Ueber die Verteilung dieser Luftpelusion von 3 bis 5 Vol. % kann man sich ein Bild machen, wenn man ausrechnet, dass sich für einen Liter Luftporen eine Anzahl von $0,02$ bis $2,6 \times 10^9$ Luftporen errechnen lässt.

Die Aufnahme dieser Luftporen in den Beton erfolgt durch Bildung einer Luftpelusion in der Suspension von Wasser, Zement und Feinsand. Da der Mörtel, gebildet aus Wasser, Zement und Sand, z. B. bis zu 4 mm, nur 30 bis 35 Vol. % des Gesamtbetonvolumens ausmacht, erreicht der Luftporenanteil im Mörtel das Mehrfache seines auf das Gesamtbetonvolumen bezogenen Wertes von 3 bis 5 %, also etwa 10 bis 15 %. Diese Luftporen, welche ein entsprechendes Volumen Sand derselben Körnung ersetzen können, sind nun ein ideales Schmiermittel. Gemäss amerikanischem Auspruch wirken sie wie Kugellager. Durch die Verbesserung der Verarbeitbarkeit erlaubt die Luftpelusion eine Verminderung der Anmachwassermenge, allerdings nicht im Ausmaße der eingeführten Luftpelusion, da sich die Luftporen eben nur wie idealer Zuschlag (Feinsand), nicht aber wie Wasser verhalten.

Die Luftporen erfüllen im Frischbeton aber noch eine weitere Aufgabe; sie stabilisieren den Mörtel oder Beton, machen ihn zusammenhaltbarer, klebriger, und vermindern dadurch die Wasserabscheidung. Durch das Verhindern des Aufsteigens des Wassers im Beton und die daraus folgende Verhinderung der Bildung von weiteren schädlichen Kapillarporen wird auch die Ansammlung des abgeschiedenen Wassers an der Unterseite von flachen oder grösseren Zuschlagskörnern verhindert, also eine weitere Ursache der Frostunbeständigkeit ausgeschaltet. Im erhärteten Beton erfüllen die Luftporen hauptsächlich zwei Aufgaben: Sie vermindern einerseits die Saugfähigkeit und Wasseraufnahme des Betons und ermöglichen andererseits dem durch die Kapillaren aufgenommenen Wasser, sich beim Gefrieren um 9 % auszudehnen⁷⁾. Beim Gefrieren des Betons gefriert das Wasser, das sich in den Kapillaren befindet, zuerst aussen und schliesst so die Kapillaren ab. Bei weiterer Frosteinwirkung nimmt die Eisbildung nach innen zu, wobei das zu Eis gefrorene Wasser ein immer grösseres Volumen beansprucht. Es entsteht daher im Eis ein Druck, der den Beton auf Zug und Druck beansprucht. Uebersteigen diese Spannungen die Zugfestigkeit des Betons, so treten Schäden auf. Im Luftporenbeton hingegen werden die wasserführenden Poren immer wieder durch Luftporen unterbrochen. Da die Luft komprimierbar ist, stehen der Eisbildung die Luftporenholträume zur Verfügung, und es können daher gefährliche Spannungen weniger oder überhaupt nicht entstehen.

Die Einführung von Luftporen in dieser Menge in das Betongefüge bewirkt natürlich auch Nachteile. Nachteilig werden vor allem die Festigkeiten, die Haftfestigkeit an Eiseneinlagen und das Raumgewicht beeinflusst. Der Abfall der Festigkeiten kann bei Ausnutzung der Anmachwasser-Verminderung bei einer Luftpelusion von 3 bis 5 % bis zu 20 % erreichen, da die mögliche Anmachwasser-Verminderung teilweise zu gering ist, um den Abfall durch den Luftporen-einschluss zu kompensieren.

Die amerikanischen und unsere Untersuchungen bestätigen, dass für Magerbetone durch die Luftpelusion einflussreicher ist.

Tabelle 3. Luftporengehalt in Funktion des Grösstkorns

Für Beton bis 30 mm Grösstkorn	4,5 % Luftporen
Für Beton bis 40 mm Grösstkorn	4,0 % Luftporen
Für Beton bis 75 mm Grösstkorn	3,5 % Luftporen
Für Beton bis 150 mm Grösstkorn	2,5 % Luftporen

eine Erhöhung der Festigkeiten zu erreichen ist und bei höher dosierten Betonen ein Abfall der Festigkeit bis zu 20 % eintreten kann⁸⁾, und dies trotz Herabsetzung des Sand- und Wassergehaltes.

Technik der Herstellung des Luftpelusion-betons

Luftpelusion-beton kann in jeder Betonmaschine hergestellt werden, indem man der Mischung der Betonbestandteile eine Luftporen einführende Substanz, also ein Schaummittel, entweder im Anmachwasser gelöst oder mit dem Zement oder mit dem Zuschlag zugibt. Diese Luftporen zuführenden Substanzen setzen die Oberflächenspannung des Wassers herab. Die notwendigen Zusatzmengen dieser Substanzen sind ausserordentlich gering und betragen meist nur Bruchteile von Promillen, auf das Zementgewicht bezogen. Das zuerst auf dem amerikanischen Markt erschienene Produkt war das Vinsol-Harz, das nach einem patentierten Verfahren aus Tannenharz hergestellt wird; andere Zusätze sind Darez AEA, Protex, N-Train, Pozzolith und Dutzende andere; auf dem europäischen Markt sind seit einigen Jahren: Frioplast, Plastocrete, Fro-Be⁹⁾ ¹⁰⁾ und Barra 55, wobei Frioplast, Plastocrete und Pozzolith neben Luftporen einführenden Stoffen noch speziell den Beton plastifizierende Stoffe enthalten. Diese kombinierten Produkte erfordern wegen des plastifizierenden Anteils Zusatzmengen von 3 bis 10 %, während von den nur Luftporen einführenden Zusätzen Mengen von 0,3 bis 1 %, bezogen auf den Zement, notwendig sind.

In den Vereinigten Staaten wurden und werden auch heute noch «air-entraining cements» = luft einführende Zemente, welche die Luftporen entwickelnden Stoffe direkt zugemahlen erhalten, verwendet.

Es zeigte sich aber, dass es nicht möglich ist, die Menge des Luftporen einführenden Zusatzes zum voraus festzulegen, wie es eben bei der Zumahlung zum Zement geschieht, da die Luftpelusion einführende von verschiedenen Faktoren, und zwar in der Hauptsache von der Granulation des Zuschlages, hauptsächlich des Sandes, dem Mörtelgehalt, der Dosierung, der Plastizität, der Mischart, der Temperatur, der Zementsorte usw. abhängig ist. Man sieht daher Luftporen einführende Produkte vor, die bei der Herstellung des Betons während des Mischens zugesetzt werden. Da die Zugabe ebenfalls meist automatisch erfolgt, kommen diese Produkte in der Hauptsache in flüssiger Form in den Handel. Durch einige Vorversuche wird zuerst die notwendige Zusatzmenge zur Erzielung einer Luftporenmenge von 3 bis 5 % bestimmt. Ist die Granulation nicht schon an der unteren Grenze des notwendigen Sandgehaltes, so wird meist eine der Luftporenmenge entsprechende Verminderung des Sandes vorgenommen, wodurch eine weitere Anmachwasser-Verminderung möglich wird. Da durch die Luftpelusion einführende die Zementdosierung sinkt, wird meist eine Herabsetzung

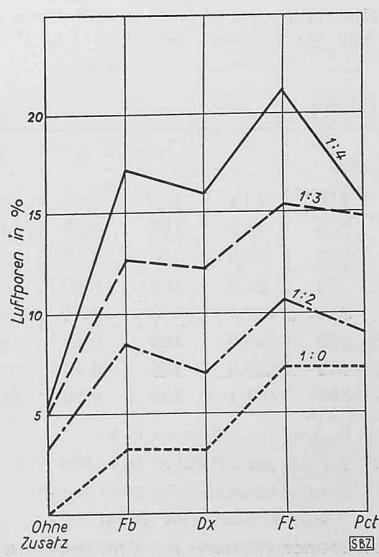


Bild 7. Luftpelusion einführende in vier verschiedenen fette Mörtel (1:0 bis 1:4), ohne Zusatz und mit vier verschiedenen Zusätzen

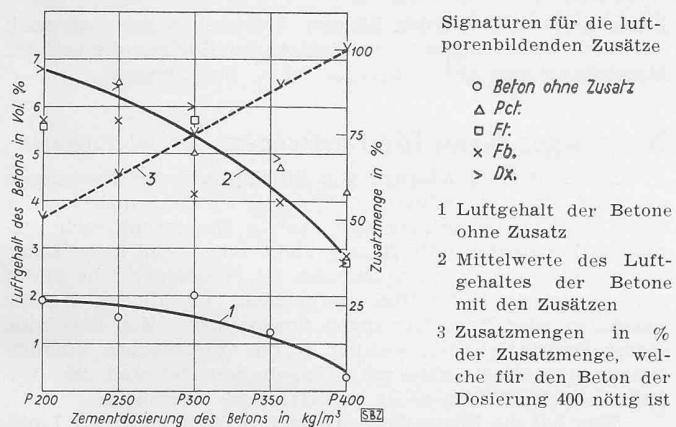


Bild 8. Luftporeneinführung durch vier verschiedene Zusätze (Legende rechts neben dem Bild) in Betone verschiedener Dosierung, aber gleicher Konsistenz, Setzmasse 3 bis 4 cm, Granulation nach Fuller, Grösstkorn 30 mm, Rundkies

des Gehaltes an Sand oder Grobzuschlag vorgenommen (sofern nicht eine der eingeführten Menge Luft entsprechende geringere Menge an Anmachwasser genommen werden kann), um einen allfälligen Festigkeitsabfall in erträglichen Grenzen zu halten. Ist die Betonmischung einmal fixiert, und sofern ihre Komponenten konstant bleiben, sind nur noch zeitweise Kontrollprüfungen des Luftgehaltes vorzunehmen.

A b h ä n g i g k e i t d e r L u t p o r e n e i n f ü h r u n g v o m M ö r t e l g e h a l t b z w . v o m G r ö s s t k o r n d e s B e t o n s .

Da die Luftporen sich nur im Mörtel befinden können, hängt der Luftporengehalt eines Betons von seinem Mörtelgehalt ab (wobei wir den Mörtel als Mischung von Zement, Wasser und Sand bis etwa 4 mm Grösstkorn definieren wollen). Es wäre daher richtiger, den Luftporengehalt für den Mörtel statt für den fertigen Beton anzugeben. Erfahrungsgemäss wird in einen Beton etwa 3 bis 4 mal weniger Luft eingeführt als in einen Mörtel. Da der Mörtelgehalt von einem Beton von kleinem Grösstkorn zu einem solchen mit grossem Grösstkorn abnimmt, nimmt auch der Luftgehalt entsprechend ab. Für die Praxis kann daher der Luftporengehalt für den Gesamt-Beton mit Zuschlag verschiedenen Grösstkornes, der allgemein mit 3 bis 5 % angegeben wird, gemäss Tabelle 3 abgestuft werden.

A b h ä n g i g k e i t d e r L u t p o r e n e i n f ü h r u n g v o m Z e m e n t d o s i e r u n g .

Die Luftporenentwicklung ist in der Hauptsache vom Sandgehalt und vom Anteil an Zuschlagskorn der Grösse 0,3 bis 1 mm abhängig. Erhöhen wir den Anteil an Feinsand der Körnung < 0,3 mm, so nimmt die Luftporeneinführung ab. Auf die gleiche Art wie Feinsand wirkt Zement: mit Erhöhung der Zementdosierung nimmt die Luftporenentwicklung ab. Der Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die Luftporenentwicklung ist am besten aus den Bildern 7 und 8 zu ersehen.

Bild 7 zeigt die Luftporeneinführung in vier verschiedenen fetten Mörtel, alle mit Sand der Zusammensetzung 0 bis 0,5 mm 14 Gewichtsprozent, 0,5 bis 2 mm 50 %, 2 bis 4 mm 36 % hergestellt, alle von gleicher plastischer Konsistenz und mit vier verschiedenen, im Handel erhältlichen Zusatzmitteln. Die Luftporeneinführung nimmt mit der Magerung des Mörtels zu, obschon die Zusatzmengen, die 0,5 bis 10 % des Zementgewichtes betragen und für jeden einzelnen Zusatz prozentual konstant blieben, auf das Gesamtvolume des Mörtels bezogen, abnehmen. Die Zusatzmenge für das Zusatzmittel Ft zum Beispiel, das für 1 kg Trockenanteil des Mörtels 1:0 5 g beträgt, ist die gleiche Menge wie für den Mörtel 1:4, aber mit einem Trockengemischanteil von 5 kg, wobei für ersteren eine Luftporenmenge von 7 %, bei letzterem aber eine solche von 20 % erzeugt wird.

Bild 8 zeigt die mittlere Luftporenentwicklung mit vier verschiedenen Zusatzmitteln, sowie ohne Zusatz für verschiedene Dosierungen für eine bestimmte Konsistenz des Betons. Mit Zunahme der Zementdosierung nimmt die Luftporenentwicklung ab, obschon die Zusatzmenge zunimmt und z. B. bei P. 400 mit einer Luftporeneinführung von 2,8 % doppelt so

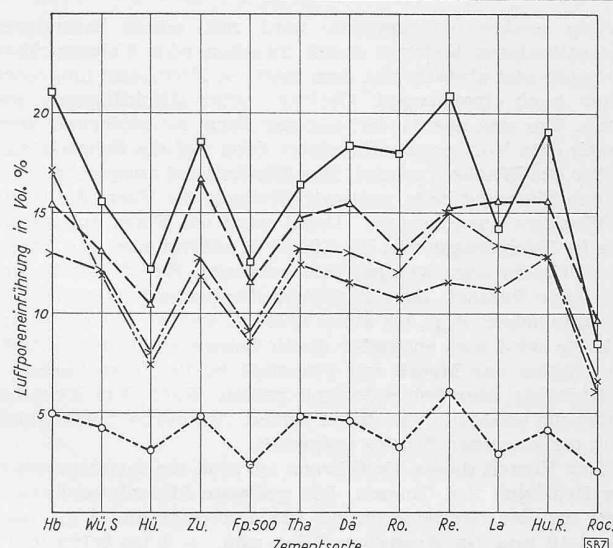


Bild 9. Luftporenbildung in Mörteln, die mit verschiedenen Zementen hergestellt wurden. Unterste Kurve: Zemente ohne Zusatz; obere Kurven: Zemente mit vier verschiedenen Zusätzen (Legende links neben dem Bild)

viel pro m³ beträgt wie bei P. 200, wo etwa 6,7 % Luftporen eingeführt werden.

A b h ä n g i g k e i t d e r L u t p o r e n e i n f ü h r u n g v o m Z e m e n t m a r k e

Dass die Luftporeneinführung auch sehr von der verwendeten Zementmarke abhängig ist, zeigt anschaulich Bild 9, welches Versuche mit verschiedenen Zementen, vier verschiedenen Zusatzmitteln und ohne Zusatzmittel, an Mörtel 1:4 von stets gleicher Konsistenz wiedergibt.

Die Schwankung der Luftporeneinführung (und zwar sowohl ohne wie mit Zusatz) allein infolge Änderung der Zementmarke kann gut 100 % betragen. Die minimalste Luftporeneinführung erfolgte bei den Zementen Hü (Schachtofenzement), Fp. 500 (Puzzolanzement) und Roc (ein äusserst fein gemahlener belgischer Zement). Die maximale Luftporeneinführung scheinen die gröber gemahlenen Zemente Hb, Zu, Da, Ro, Re und Hu.R zu geben. Ebenfalls ist interessant, dass der Luftgehalt im Mörtel ohne Zusatz im genau gleichen Sinne sich ändert wie mit den Zusätzen (untere Kurve).

Schluss folgt.

Präzisionsguss

DK 621.744.59

Von Ing. Dr. O. H. C. MESSNER, Zürich. Auszug aus einem Vortrag vor der Technischen Gesellschaft Zürich, gehalten am 3. Dez. 1951.

Unter der Bezeichnung Präzisionsguss (Precision Casting) wird in der modernen Technik ein Verfahren verstanden, dessen Auswertung verhältnismässig neu, das aber in seinen Grundzügen bereits seit Jahrtausenden bekannt ist (Cire perdu procédé). Anstelle eines permanenten Modelles aus Holz oder Metall, nach dem zwei Formhälften hergestellt werden, wird bei diesem Verfahren ein Modell aus Wachs oder einem anderen leicht schmelzenden Material verwendet, das beim Prozess verlorengeht. Die Form ist einteilig, ohne Nähte und sehr genau.

Während die Technik des Altertums sich nicht daran stiess, dass die Form einmalig war, hat das Verfahren erst durch die Entwicklung entsprechender Verarbeitungsmethoden zur billigen Herstellung einer Grosszahl von Wachsformen des gleichen Modells in der Neuzeit wieder Verwendung gefunden. Nach verschiedenen Verfahren wird zuerst eine sehr präzise Form aus Weissmetall, Messing oder Stahl hergestellt. Mit einer einfachen, spritzgussähnlichen Vorrichtung werden nun in dieser zwei- oder mehrteiligen Kokille einzelne Modelle in Wachs (neuerdings auch in Kunstharz oder Quecksilber) gegossen und für die Zusammenstellung eines ganzen Gussmodells zubereitet. Eine Gussform enthält meistens mehrere, ja bis viele hundert Kleinststücke, damit ein Gussgewicht von einigen Kilos erreicht wird. Anschliessend an den Guss der Einzelmodelle folgt die Zusammenstellung der Gussform aus diesen Gussteilen unter Beifügung von Anguss, Zuläufen usw.