



Doctoral Thesis

## Pneumatische Förderung von Frischbeton

**Author(s):**

Gengenbach, Peter Alfred

**Publication Date:**

1969

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000085756> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. Nr. 4139

# PNEUMATISCHE FÖRDERUNG VON FRISCHBETON

Abhandlung  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktors der Technischen Wissenschaften  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

vorgelegt von  
PETER ALFRED GENGEBACH  
dipl. Maschinen-Ing. ETH  
geboren am 27. Dezember 1929  
von Basel

Angenommen auf Antrag von  
Prof. O. Zweifel, Referent  
Prof. G. Schnitter, Korreferent

# 1. Einleitung

## 1.1 Charakterisierung des hier vorwiegend untersuchten Förderprinzips

Da in der Terminologie der Förderung von Frischbeton in Rohrleitungen einige Unklarheit herrscht, seien hier die verschiedenen angewendeten Systeme aufgezählt:

### a) *Mechanische Förderung mit speziellen Beton-Kolbenpumpen*

Der Beton wird vom Kolben unter statischer Kraft in die Leitung gedrückt und bewegt sich als kompakte, pumppfähige Masse.

### b) *Pneumatische Förderung*

b<sub>1</sub> *Pneumatische Förderung unter rein statischen Luftkräften*, von der mechanischen Förderung nur dadurch unterschieden, dass der Beton anstatt mit einem Kolben mit Druckluft aus einem sogenannten Treibkessel (vgl. Abb. 44) in die Leitung gepresst wird. Da die Luft *über* dem eingefüllten Beton zugeführt wird, spricht man von «Oberluft». Ist alles Material aus dem Treibkessel in die Förderleitung eingetreten, so wird neuer Beton eingefüllt und die nächste Charge gefördert. Die Leitung ist auch hier (wie bei der Verwendung von Kolbenpumpen) ständig ganz gefüllt, und an ihrem Ende tritt bei jedem Arbeitsspiel eine dem Treibkesselinhalt entsprechende Menge aus. Diese Art der pneumatischen Förderung von Beton wird vor allem in Deutschland und Frankreich angewendet, wo sie auch «Förderung mit gefüllter Rohrleitung», bzw. «transport en continu» heisst.

b<sub>2</sub> *Pneumatische Förderung unter statischen und dynamischen Luftkräften*, indem in den Treibkessel sowohl «Oberluft» *über* den Beton als auch

in der Gegend des abgehenden Förderrohres «Unterluft» in den Beton hinein zugeführt wird (vgl. Abb. 44). Analog zu der unter  $b_1$  beschriebenen statischen Förderung bezeichnet man diese Art der pneumatischen Betonförderung als statisch-dynamische Förderung. Bei ihr kann die Leitung grundsätzlich nach jedem Förderspiel entleert sein. In der Regel bleibt jedoch ein von verschiedenen Umständen abhängiger Rückstand liegen.

- $b_3$  *Pneumatische Förderung unter rein dynamischen Luftkräften*, dadurch erreicht, dass in meist *speziellen* Treibkesseln Luft zugeführt wird, die in den konventionellen Treibkesseln reiner Unterluft entsprechen würde. Dieses Prinzip wird vor allem bei den verschiedenen Betonspritzverfahren angewendet, wo das trockene oder erdfeuchte Zement-Zuschlagstoff-Gemisch im Luftstrom zur Mischdüse getragen und in dieser während des Austritts mit dem Anmachwasser versetzt wird. (Bis auf die Zugabe von Wasser an der Mischdüse entspricht die dynamische pneumatische Betonförderung der bekannten pneumatischen Förderung von Getreide, Kohle, Spänen, Zement usw.)

Die vorliegende Untersuchung erstreckt sich *vorwiegend* auf die statisch-dynamische pneumatische Betonförderung ( $b_2$ ). Deren besondere Stärke liegt darin, dass sie den Rohrtransport von Betonen erlaubt, bei denen Kornzusammensetzung, Zementgehalt und WZW<sup>1</sup> innerhalb der heute normalerweise vorkommenden Grenzen praktisch beliebig gewählt werden können. Die Gründe für diese weitgehenden Freiheiten in der Beschaffenheit des Betons lassen sich erst aus dem späteren verstehen (Abschn. 2.2.31, 2.2.33 und 2.2.34). Die statisch-dynamische Förderung unterscheidet sich damit klar von der statischen Förderung ( $a$  und  $b_1$ ), bei deren Anwendung an die Granulometrie strenge Anforderungen gestellt sind und der WZW von erheblicher Bedeutung ist. (Das Problem der statischen Förderung wird als Ergänzung in Abschn. 2.2.4 gestreift.) Weiter erweist sie sich nach WEBER [1] in einem bestimmten Bereich der

<sup>1</sup> Der Ausdruck «Wasserzementwert» wird hier durchwegs mit WZW abgekürzt.

Förderleistung als das wirtschaftlichste Verfahren der Rohrförderung (s. S. 235). Ferner bietet die Rohrförderung von Beton auf pneumatischem Wege ganz allgemein den Vorteil, dass die Gesteungskosten für den Treibkessel unter denjenigen für die Kolbenpumpe liegen und dass das System im Unterhalt einfach und, was die Aufgabevorrichtung anbelangt, auch billig ist, da am Treibkessel keine durch Bewegung verschleissenden Teile vorhanden sind.

Diese Umstände liessen die statisch-dynamische pneumatische Betonförderung als derart vorteilhaft erscheinen, dass sie vor allem Ende der fünfziger und Anfang der sechziger Jahre praktisch in jeder Sparte des Baugewerbes, besonders aber im Stollenbau, zum Einsatz kam. Eine Übersicht über die historische Entwicklung findet sich bei WEBER [1 und 2]. Leider erwies es sich, dass das System vor allem mit zwei misslichen Mängeln behaftet war: Erstens gelang es sehr oft nicht, eine befriedigende Betriebssicherheit zu erreichen, indem nämlich aus meist unerklärlichen Gründen plötzliche Verstopfungen in der Förderleitung auftraten oder gar überhaupt keine Förderung erreicht werden konnte. Das Beheben einer Verstopfung gelingt manchmal durch Klopfen am Förderrohr. Sehr oft muss die Leitung aber demontiert und in mühseliger Arbeit ausgekratzt werden. Dadurch kann der Betonierbetrieb für Stunden lahmgelegt werden, was vor allem bei Wiederholungen völlig untragbar ist. Ein zweiter Nachteil wurde darin gefunden, dass der Beton bei der Förderung zur Entmischung neigt. Dieser Mangel ist bei den heutigen an die Betonfestigkeit gestellten hohen Anforderungen ebenso schwerwiegend wie der erste. Aus diesen Gründen verlor die statisch-dynamische Betonförderung in den letzten Jahren zugunsten der Rohrförderung mit Kolbenpumpen stark an Interesse.

## **1.2 Bisherige Kenntnisse**

Das pneumatische Fördern von Beton wurde vor allem in zahlreichen Artikeln beschrieben, z. B. in [3 bis 9]. In diesen finden sich meist neben einer technologischen Beschreibung der betreffenden Anlage auch em-

pirisch gewonnene Angaben über Massnahmen, die zu treffen sind, damit überhaupt eine befriedigende Förderung gelingt. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass solche Angaben in der Regel richtig sind. Dagegen bestehen aber auch eindeutig irri- ge Ansichten, und zwar sowohl in bezug auf bestimmte zu erfüllende Bedingungen als auch auf die Dringlichkeit ihrer Erfüllung (vgl. Abschn. 3.5.31). Dies hat seinen Grund zum Teil darin, dass in gewissen Fragen von den viel gesicherteren Kenntnissen des Betriebs der Beton-Kolbenpumpen fälschlicherweise auf die pneumatische Förderung geschlossen wird<sup>1</sup>. Häufig werden auch Angaben gemacht über Förderleistung und Energieverbrauch. Leider ist es meistens nicht möglich, im einzelnen Fall zu entscheiden, ob eine für die pneumatische Betonförderung allgemein gültige Aussage gemacht wird oder ob sie nur für die Förderung mit dem bestimmten Treibkesseltyp oder unter den bestimmten besprochenen Umständen gilt. Ferner ist oft nicht einmal genau ersichtlich, um welche Art der pneumatischen Förderung es sich überhaupt handelt. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass die Angaben selten untereinander übereinstimmen.

Einigermassen einheitliche Meinungen herrschen bezüglich der in günstigen Fällen erreichbaren Förderweiten und Förderhöhen. Diese werden etwa gleich den beim Pumpen erreichbaren angegeben, d. h. horizontal ca. 350 m, vertikal ca. 50 m. Weiter sind sich die Autoren einig, dass die Kornzusammensetzung im Beton beim statisch-dynamischen Fördern nicht die gleich wichtige Rolle spielt wie beim Pumpen und ebenso, dass der WZW kleiner sein darf. Bezüglich der Leitungsführung wird allgemein empfohlen, Steigungen an den Anfang der Leitung zu legen und vor Krümmern stets ein hinreichend langes gerades Stück anzubringen. Für die Krümmer selbst wird ein möglichst grosser Krümmungsradius gefordert. Ferner wird stets die Schmierung der Leitung vor Beginn des Förderns verlangt.

1 Veröffentlichungen über das Fördern von Beton mit Kolbenpumpen sind in grosser Zahl erschienen. Eine Darstellung der Ergebnisse der wichtigsten Arbeiten findet sich bei WEBER [1 und 2], der in seiner eigenen Untersuchung weitere wertvolle Resultate liefert.

Einige glaubwürdige und brauchbare Angaben über den Einfluss der Leitungsverlegung auf die Förderleistung finden sich bei FAUNER [10], GARBOTZ [11] und die in Deutschland erscheinenden Merkblätter über sachgemässe Stahlverwendung [12] geben für verschiedene Typen von pneumatischen Betonförderern Unterlagen über den Luftverbrauch und die Förderdrücke in Funktion von Förderweite und Förderhöhe. Ähnliche Angaben werden in den meisten Betriebsanleitungen für die pneumatischen Betonförderer gemacht. Über wirtschaftliche Anwendungsbereiche im Vergleich zum Pumpen sei wiederum auf FAUNER [10] und GARBOTZ [11] verwiesen. Beim letztgenannten Autor wird auch die Frage der Anschaffungs- und Unterhaltskosten gestreift.

In Anbetracht der Vielfalt ungeordneter Kenntnisse entstand schon früh ein dringendes Bedürfnis nach systematischen Untersuchungen. Im Jahre 1933 veröffentlichte HOFFMANN [13] Messergebnisse über Förderleistung und Luftverbrauch beim Einsatz des ersten «Johnny»-Druckluftförderers in Deutschland. Hierbei wurde aber eine rein dynamische Förderung (b<sub>3</sub>, S. 14) angewendet, so dass die Arbeit HOFFMANNS keinen Beitrag zur Frage der statisch-dynamischen Förderung bringt. (Die rein dynamische Förderung wird heute nur noch für trockenes oder erdfeuchtes Zement-Zuschlagstoff-Gemisch verwendet.) Erst 1956 wurden von WEBER [1] am Institut für Baumaschinen und Baubetrieb der T. H. Aachen (Prof. Dr. G. GARBOTZ) entsprechende Versuche aufgenommen. Die Resultate wurden 1961 als Dissertation veröffentlicht. Diese Arbeit bringt insbesondere wertvollen Aufschluss über wirtschaftliche Fragen der pneumatischen Betonförderung. Bei einer grossen Anzahl von Förderungen wurden alle massgeblichen Grössen wie Förderleistung und Energieverbrauch aufgenommen, und mit gleichzeitig durchgeführten Zeitstudien gelang es, die Betriebskosten verschiedener pneumatischer Betonförderanlagen miteinander zu vergleichen. Sodann wurde untersucht, wie sich eine unterschiedliche Bedienung der Anlagen auf den Luftverbrauch und damit auf die Betriebskosten auswirkt. Als Zusammenfassung wurden Gleichungen aufgestellt, die es erlauben, in der Praxis den Energiebedarf und die totalen Betriebskosten für irgendeine geplante Förderung vorauszubestimmen. Diese Regeln bedeuten für

den Praktiker eine äusserst wertvolle Hilfe beim Aufstellen von Zeitplänen und bei der Vorkalkulation.

Über eine ähnliche, aber viel kleinere systematische Untersuchung wurde 1958 in Russland von PODBORSKY/SAMOILOW [14] berichtet. Sie ist aber weniger wegen einiger Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen interessant als vielmehr, weil in ihr der Versuch einer Erklärung der Bewegung des Betons in der Rohrleitung gemacht wird (s. u.).

Da angenommen werden durfte, dass die Ursachen für das häufige Verstopfen der Förderleitung in der Art und Weise der Bewegung des Betons zu suchen sind, war dieses Problem Gegenstand verschiedener Überlegungen. Diese sind aber meist nur auf Vermutungen gestützt. So schreibt FAUNER [10] 1956: «Grundsätzlich liegt wohl die wirklich auftretende Förderung im Rohr beim neuen „Placy“ und den ihm entsprechenden Förderern zwischen einer rein statischen Förderung in geschlossenem Pfropfen, evtl. mit kleineren Lufteinschlüssen, und einer rein dynamischen Förderung im Luftstrom. Der Transport des Betons erfolgt jedenfalls in längeren oder kürzeren Pfropfen mit dazwischenliegenden Luftpuffern (fallenden Druckes gegen die Austrittsöffnung des Rohres zu), und die Bauweise des Aufnahmegefässes und speziell des Überganges zum Förderrohranschluss wurde darauf abgestellt, dass die laufende Bildung der einzelnen Pfropfen in möglichst gleichmässiger Länge erzielt wird.»

Zur gleichen Frage äussert sich GARBOTZ [11] 1958: «Während die Betonspritzmaschinen das Mischgut zuerst mehr oder weniger trocken durch die hohe Geschwindigkeit des Luftstromes in diesem suspendiert mitnehmen, wird bei den pneumatischen Betonförderanlagen im wesentlichen der Luftdruck benützt, um eine durch die Kesselfüllung bedingte Betonsäule vor sich her zu treiben. Erleichtert wird dieser Vorgang allerdings dadurch, dass neben der Oberluft, die auf den Betonspiegel drückt, dem Auslauf auch noch Unterluft zugeführt wird. ...

Wie weit hierdurch eine Materialauflockerung, ein Auflösen in einzelne Betonpfropfen oder ein gewisses Schweben im Luftstrom stattfindet, ist noch nicht geklärt.»

Sowohl bei WEBER als auch in der erwähnten Untersuchung von POD-



BORSKY/SAMOLOW wird auf das Problem der Bewegung des Betons im Förderrohr näher eingegangen. Die von diesen Autoren gemachten Beobachtungen werden an späterer Stelle im Zusammenhang besprochen werden.

Drei Autoren haben es ferner versucht, teils durch theoretische Überlegungen, teils durch Versuche die Widerstände zu erfassen, die bei der Bewegung des Betons durch Rohrleitungen auftreten. Die drei Arbeiten stammen von JOISEL [15], ALEKSEJEW [16] und EDE [17].

In einem experimentellen ersten Teil seiner Veröffentlichung untersucht JOISEL unter anderem die Reibungskoeffizienten verschiedener Betone gegenüber Stahl. Im zweiten Teil der Arbeit stellt JOISEL einige theoretische Überlegungen über den Mechanismus der Bewegung des Betons in der Rohrleitung an. Diese Überlegungen werden von EDE erweitert und teilweise korrigiert, weshalb sich hier eine weitere Besprechung erübrigt.

ALEKSEJEW'S Arbeit befasst sich ausschliesslich mit Gesetzmässigkeiten, die beim statischen Rohrfördern ( $a$  und  $b_1$ , S. 13) des Betons auftreten. Sie kann in der vorliegenden Untersuchung unberücksichtigt bleiben, da diese vor allem die statisch-dynamische Förderung nach  $b_2$  behandelt.

EDE befasst sich im ersten Teil seiner Arbeit mit gesättigtem Beton. Die heute in der Praxis verwendeten Betone sind aber immer mehr oder weniger ungesättigt, so dass die betreffenden Ausführungen EDES hier ebenfalls ausser Betracht gelassen werden können. Im zweiten Teil seiner Arbeit betrachtet EDE ungesättigten, mit einem Kolben geschobenen Beton. Mit den Gleichgewichtsbedingungen an einem Volumenelement leitet er eine Gleichung für den Druckverlust bei der Bewegung durch eine Rohrleitung ab. Er findet für den zum Bewegen eines Pfropfens von bestimmter Länge nötigen Druck ein exponentielles Gesetz. Die in diesem Gesetz auftretenden Konstanten wurden experimentell bestimmt, indem verschiedene Betone unter veränderlicher achsialer Belastung in einer zylindrischen Versuchseinrichtung verschoben und alle interessierenden Grössen, insbesondere der auftretende radiale Druck, gemessen wurden («sliding compression test»). Weitere Mitteilungen aus

der Untersuchung von EDE folgen in der vorliegenden Arbeit an entsprechender Stelle.

EDES Betrachtungsart ist von gewissem Nutzen für die Untersuchung der statisch-dynamischen pneumatischen Betonförderung. Sie erfordert aber eine Erweiterung, weil der Angriff der Luft nicht wie bei der Anwendung eines mechanischen Kolbens nur auf der Stirnfläche des zu bewegenden Betons erfolgt, sondern auch in seinem Innern.

### **1.3 Ziel der Untersuchung**

Im letzten Abschnitt wurde erwähnt, dass die wirtschaftlichen Fragen der statisch-dynamischen pneumatischen Betonförderung durch die Arbeit von WEBER befriedigend abgeklärt werden konnten. Dagegen wurde das Problem der ungenügenden praktischen Beherrschung bis heute noch nicht gelöst. Dies hat seinen Grund vor allem darin, dass genauere Kenntnisse vom Mechanismus der Bewegung des Betons in der Rohrleitung trotz den Arbeiten von WEBER und POBORSKY/SAMOLOW noch fehlen. Überdies mangelt es auch am Verständnis der Vorgänge bei der Aufgabe des Betons vom Treibkessel in die Förderleitung, wobei vor allem die oft genannte Pfropfenbildung eine unklare Rolle spielt. Es wäre also von grossem Nutzen, weitere Erkenntnisse zu gewinnen, an denen die vielfältigen und oft unerwarteten Erscheinungen orientiert werden könnten.

Dies war die Grundidee bei der Planung der vorliegenden Untersuchung. Dabei stand es von vorneherein fest, dass sich die Notwendigkeit von praktischen Versuchen ergeben werde. Es stellte sich nun die Frage, ob diese Versuche auf Baustellen oder an einer eigenen Anlage durchgeführt werden sollten. Da der Baustellenbetrieb es ausschliesst, dass die Versuchsbedingungen genau eingehalten oder beliebig abgeändert werden können, da er auch nur beschränkte Möglichkeit für Messungen bietet und da ferner die Durchführung der Versuche auf Baustellen für beide beteiligten Seiten eine Behinderung mit sich bringt, fiel die Wahl auf eine

eigene Versuchsanlage. Die in Abschn. 3.3 beschriebene Versuchsanlage wurde darauf ausgerichtet, Zusammenhänge zu erkennen zwischen der Bewegung des Betons und den vermutlich massgebenden Grössen wie Betonbeschaffenheit oder Luftführung. Aus solchen Zusammenhängen sollten weitere Angaben für die Förderpraxis abgeleitet werden, die es ermöglichen, die häufig auftretenden Verstopfungen zu vermeiden. Das Hauptziel der Untersuchung war es, der statisch-dynamischen pneumatischen Betonförderung durch eine Verbesserung der Betriebssicherheit wieder vermehrte Aufmerksamkeit und Anwendung zu verschaffen. Dieses Ziel rechtfertigt sich durch die bereits in Abschn. 1.1 genannten Vorteile dieser Förderart, insbesondere dadurch, dass sie als einzige Variante der Beton-Rohrförderung den Transport von Betonen erlaubt, deren Kornzusammensetzung, Zementgehalt und WZW dem normalen heute üblichen Gebrauch entsprechen.