

# Nachrütteln des Betons bewehrter Brückenplatten

Von Eberhard Siebel, Düsseldorf \*)

## Übersicht

*Querrisse in bewehrten Brückenplatten können besonders bei Verwendung von Tausalzen ein Rosten der Bewehrung verursachen. Solche Risse können schon im Frischbeton infolge Verformung der Schalung oder durch ein Setzen des Betons über oben liegenden Bewehrungsstäben entstehen.*

*Im Laboratorium wurde untersucht, ob durch Nachrütteln Risse, die im frischen Beton entstanden sind, wieder geschlossen werden können und wie sich ein Nachrütteln auf die Beständigkeit und Festigkeit des Betons auswirkt. Ergänzend wurden Versuche an Fahrbahnplatten von drei Brücken durchgeführt. Über das Verhalten dieser Platten liegen noch keine Ergebnisse vor.*

*Im Laboratorium konnten durch Nachrütteln mit einem Oberflächenrüttler Biegerisse, Lockerungen in der Ebene der oberen Flächenbewehrung und Schrumpfrisse bis zu einer Tiefe von mindestens 10 cm geschlossen werden. Dies war möglich, solange die Versteifung, gekennzeichnet durch den Eindringwiderstand einer Stahlnadel nach ASTM-C 403-68, nicht größer als rd. 4 kp/cm<sup>2</sup> war.*

*Die Druckfestigkeit und der Abnutzungswiderstand von Beton wurden durch das Nachrütteln nicht deutlich beeinträchtigt. Der Abstandsfaktor des LP-Betons wurde nur in der Nähe der oberen Betonfläche etwas größer. Das Nachrütteln verbesserte den Widerstand gegen Abschiefern infolge Frost-Tausalz-Beanspruchung nur geringfügig.*

## 1. Allgemeines

Schäden an der oberen Fläche bewehrter Brückenplatten können umfangreiche Instandsetzungsarbeiten nötig machen, die kostspielig sind und zur Behinderung des Verkehrs führen. Nach zahlreichen Untersuchungen von Brücken in den Vereinigten Staaten wurde festgestellt, daß solche Schäden allgemein keine

---

\*) Auszugsweise Wiedergabe einiger Feststellungen aus dem Bericht von Hilsdorf, H. K., und J. L. Lott: Revibration of retarded concrete for continuous bridge decks, University of Illinois, Civil Engineering Studies, Structural Research Series No. 356, Urbana/III, 1969; ebenso Highway Research Board, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 106, Washington 1970.

einheitliche Ursache haben. Sie traten jedoch häufig als Abplatzungen an der Betonoberfläche auf, die – außer auf schlechtes Zuschlaggestein – auf ungenügenden Gehalt künstlicher Luftporen im Mörtel (verminderter Tausalz widerstand) und auf Querrisse über der oberen Querbewehrung zurückgeführt werden.

Anlaß für einen ungenügenden Luftporengehalt im erhärteten Beton können ein zu geringer Ausgangsluftgehalt, das Aufsprühen von Wasser bei der Bearbeitung der Oberfläche und eine übermäßige oder zu späte Bearbeitung der Oberfläche sein.

Das Entstehen der Querrisse in Brückenplatten kann zahlreiche Ursachen haben, wie z. B. Überbelastung der Brücke und Schwinden des erhärteten Betons. Jedoch noch bedeutsamer scheinen die Risse zu sein, die schon im frischen Beton entstehen, und zwar durch

1. die durch Zuschläge und Bewehrung behinderte Volumenverminderung des frischen Zementleims,
2. Durchbiegen und Verdrehen der Schalung beim Einbringen des Betons,
3. Setzen von wasserabsonderndem Beton über der oberen Bewehrung.

Die Risse führen zu erheblichen Folgeschäden, wenn durch das eindringende Wasser, besonders Wasser mit gelösten Tausalzen, die Bewehrung Rost ansetzt, der die Betonüberdeckung abdrückt.

Hierzu soll aus den umfangreichen Untersuchungen folgendes wiedergegeben werden:

## **2. Versuche im Laboratorium**

Die Aufgabe war, festzustellen, ob durch Nachrütteln Risse im plastischen Beton wieder geschlossen werden können und inwieweit durch das Nachrütteln die Festigkeit und Beständigkeit des Betons – insbesondere der Frost-Tausalz-Widerstand – verändert werden.

Folgende Varianten wurden u. a. einbezogen:

1. Verschiedene Rüttler (Innenrüttler, Rütteltisch und Rüttelbohle) sowie verschiedene Rüttelenergien,
2. verschiedene Versteifungsgrade des Betons zum Zeitpunkt des Nachrüttelns,
3. Einfluß eines Verzögerers.

### **2.1 Eigenschaften des Betons**

Als Zement wurde ein Zement des Typs I (gewöhnlicher Konstruktionszement) und als Zuschlag Quarzsand und gebrochener Kalkstein mit einem Größtkorn von 25 mm verwendet. Alle Mischungen wurden mit einem Zementgehalt von rd. 290 kg/m<sup>3</sup> und einem Wasserzementwert von 0,64 hergestellt. Das Setzmaß (ASTM-C 143-66) betrug 5 bis 10 cm (etwa Konsistenz K 3). Der Luftporengehalt lag zwischen 5,5 und 6,5 %. Die Würfeldruck-

festigkeit nach 28 Tagen betrug rd. 500 kp/cm<sup>2</sup> (geprüfte Zylinderdruckfestigkeit auf 20-cm-Würfel und eine Lagerung nach DIN 1048 umgerechnet)<sup>1)</sup>.

Der Erstarrungsbeginn des Betons und das Erstarrungsende wurden nach ASTM-C 403-68 ermittelt. Diese Prüfung wird folgendermaßen durchgeführt:

Von dem Beton wird der Mörtel 0 bis 4,8 mm abgesiebt, von Hand erneut durchgemischt und in einer Form (Höhe, Länge und Breite mindestens je 15 cm) mit einem Stampfer verdichtet. Anschließend wird eine zylindrische Stahlnadel (Proctornadel) ungefähr nach jeder Stunde 2,5 cm tief innerhalb von 10 s in den Mörtel eingedrückt und die dazu notwendige Druckkraft abgelesen. Der Erstarrungsbeginn (in ASTM-C 403-68 mit 35 kp/cm<sup>2</sup> definiert) des verwendeten Betons lag bei rd. 3,5 Stunden und das Erstarrungsende (mit 280 kp/cm<sup>2</sup> definiert) bei rd. 5,5 Stunden. Der Erstarrungsbeginn des Betons mit Verzögerer wurde nach 7 bis 8 Stunden und das Ende nach rd. 9 Stunden festgestellt.

## 2.2 Herstellung und Lagerung der Probekörper

Für die Untersuchungen wurden Balken 7,5 cm x 7,5 cm x 37,5 cm und 15 cm x 15 cm x 45 cm sowie Platten 61 cm x 61 cm x 15 cm mit einer oberen und unteren Bewehrungslage hergestellt. Die Probekörper wurden auf einem Rütteltisch verdichtet.

Zusätzlich wurden größere Platten 244 cm x 92 cm x 15 cm in einer biegsamen Stahlschalung gefertigt; der Beton wurde mit einem Innenrüttler verdichtet. Diese Platten wiesen eine oben liegende Flächenbewehrung mit einer Betonüberdeckung von rd. 3 cm auf, zum Teil auch eine untere Bewehrungslage. Nach 2 bis 4,5 Stunden wurden diese Platten zum Teil nach oben so durchgebogen, daß Risse mit kleiner, mittlerer und größerer Weite auftraten (siehe Tafel 1).

Tafel 1 Risse beim Durchbiegen der bewehrten Versuchsplatten 244 cm x 92 cm x 15 cm (Beton 2 bis 4,5 Stunden alt)

	Rißweite mm	mittlerer Abstand der Risse cm	Durchbiegung der Bodenschalung in der Mitte cm
kleine Risse	0,03 bis 0,05	13 bis 25	1,3
mittlere Risse	0,13 bis 0,25	5 bis 8	5,1
große Risse	0,76 bis 1,27	3 bis 5	8,9

Die Risse entstanden über oberen Querstäben auf die gesamte Plattenbreite. Quer-Schrumpfrisse (siehe Abschnitt 1 unter 1. und

<sup>1)</sup> Siehe Walz, K.: Beton- und Zementdruckfestigkeiten in den USA und ihre Umrechnung auf deutsche Prüfwerte. Betontechnische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 123/140.

3.) bildeten sich ohne Verformung nur unter extremen Lagerungsbedingungen (starke Luftbewegung und Temperaturen zwischen 35 und 43 °C). Gestörte Zonen in der oberen Bewehrungsebene mit erhöhter Porosität infolge veränderter Volumenverminderung des frischen Zementleims konnten auch bei extremen Lagerungsbedingungen nicht erhalten werden. Diese in der Praxis vorkommende Gefügelockerung in der Ebene der oberen Bewehrungslage wurde daher durch ein geringes Anheben der oberen Bewehrung 2 Stunden nach Einbringen des Betons erzeugt.

Die obere Fläche aller Probekörper wurde mittels einer Kelle geglättet. Probekörper, die für die Prüfung des Tausalzwidehstands und der Festigkeit vorgesehen waren (siehe Abschnitt 3.3), wurden bei 20 °C 7 Tage in einer Nebelkammer und anschließend in einem Klimaraum mit 50 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert.

### **2.3 Rüttler**

Der benutzte Innenrüttler hatte einen Durchmesser von 5 cm. Seine Schwingungszahl lag bei 7000 je Minute.

Die Schwingungszahl des Rüttlers der 20 cm breiten und rd. 96 cm langen Rüttelbohle betrug 3200 je Minute und seine maximale Zentrifugalkraft 408 kg. Die Versuche wurden teils mit hoher Rüttelenergie (80 % der maximalen Zentrifugalkraft, das sind 326 kg) und teils mit niedriger Rüttelenergie (20 % der maximalen Zentrifugalkraft, das sind 82 kg) ausgeführt.

Der Rütteltisch wurde mit demselben Rüttler betrieben wie die Rüttelbohle, und zwar mit einer Rüttelenergie von 80 % der maximalen Zentrifugalkraft. Die Formen für die Prismen und Platten wurden fest auf den Rütteltisch gespannt.

## **3. Ergebnisse der Laboratoriumsversuche**

Bei Vorversuchen zeigte sich, daß der Innenrüttler für das Nachrütteln der Platten unzweckmäßig war, da der Beton sich hinter dem Rüttler nicht wieder vollkommen schloß. Das Verdichten mit der Rüttelbohle war zweckmäßig. Diese und der Rütteltisch wurden bei dem Hauptversuch bei allen Proben verwendet.

### **3.1 Schließen von Rissen im Frischbeton**

Die Versuche wurden an den Platten 244 cm x 92 cm x 15 cm, die mit einem Innenrüttler erstmalig gerüttelt worden waren, durchgeführt. Die obere Fläche wurde mit einer Kelle geglättet. Zum Nachrütteln wurde die Rüttelbohle in der Höhenlage so geführt, daß sie auf dem Beton auflag, aber nicht in ihn eindringen konnte. Die Rüttelbohle wurde mit einer Geschwindigkeit von 23 cm je Minute einmal über die Betonoberfläche gezogen. Die meisten der künstlich erzeugten Risse (Tafel 1) konnten durch den mit hoher Rüttelenergie betriebenen Oberflächenrüttler geschlossen werden, wenn der Eindringwiderstand der Stahlnadel (siehe Abschnitt 2.1) höchstens 4,2 kp/cm<sup>2</sup> betrug. Die Rüttelenergie reichte aus, um Risse zu schließen, wenn sich nach dem Überfahren ein Feuchtigkeitsfilm auf der Betonoberfläche gebil-

det hatte oder wenn eine bereits entstandene Zementhaut sich wieder einarbeiten ließ. Verschieden starke Bewehrung ergab keinen Unterschied. Die Wirkung des Nachrüttelns reichte 5 bis 10 cm tief. Die obere Fläche erhielt nach dem Nachrütteln nur noch einen Besenstrich.

### 3.2 Luftporenkennwerte

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in dem Originalbericht u. a. in Tafeln zusammengestellt; ein Teil dieser Werte ist hier in den Bildern 1 und 2 aufgetragen.

#### 3.2.1 Nachrütteln mit der Rüttelbohle

Dem Einfluß eines Nachrüttelns mit der Rüttelbohle auf die Luftporenkennwerte wurde an einer Hälfte einer Platte 244 cm x 92 cm x 15 cm nachgegangen (siehe Abschnitt 3.1). Als Luftporenkennwerte wurden am erhärteten Beton der Luftporengehalt und der Abstandsfaktor bestimmt (ermittelt durch Ausmessen von Schnittflächen nach ASTM-C 457-66, Modified Point-Count Method).

Nach Bild 1 verminderte sich der Luftporengehalt rd. 1 mm unter der Oberfläche gegenüber dem im Drucktopf nach dem Mischen gemessenen Luftporengehalt von 5,8 % durch Befördern, Einbringen und erstmaliges Rütteln mit dem Innenrüttler sowie durch das Glätten mit der Kelle auf 3,2 % und durch das Nachrütteln mit der Rüttelbohle weiter auf 3,0 %. Bis zur Tiefe von rd. 1,5 cm stieg der Luftporengehalt des erstmalig gerüttelten Betons auf rd.

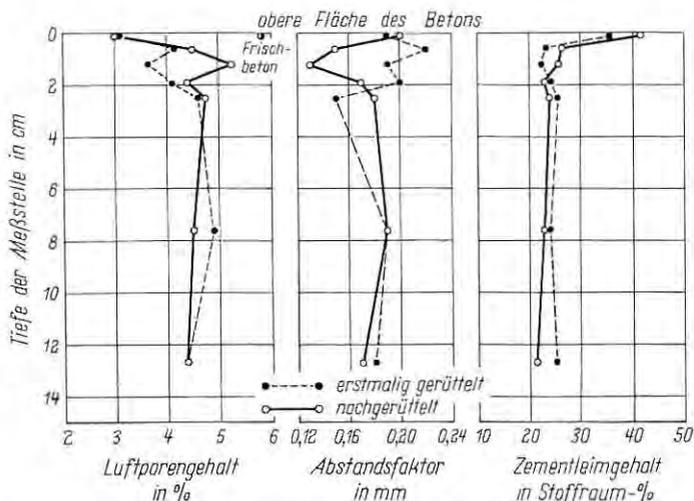


Bild 1 Luftporengehalt, Abstandsfaktor und Zementleimgehalt einer 15 cm dicken Betonplatte 244 cm x 92 cm, deren Beton mit einem Innenrüttler erstmalig gerüttelt und deren eine Hälfte mit einer Rüttelbohle nachgerüttelt wurde; Messungen in 7 verschiedenen tief liegenden Zonen (Luftporengehalt des Betons im Drucktopf nach dem Mischen 5,8 %)

4 ‰ und der des nachgerüttelten Betons auf rd. 5 ‰ an. Im unteren Bereich der Platte wurde für den erstmalig gerüttelten und nachgerüttelten Beton ein Luftporengehalt im Mittel von rd. 4,6 ‰ festgestellt.

Der Abstandsfaktor war direkt unter der Oberfläche beim nachgerüttelten Beton mit 0,20 mm geringfügig größer als beim nicht nachgerüttelten Beton mit 0,19 mm (ein Abstandsfaktor von 0,20 verbürgt einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand). Er nahm jedoch beim nachgerüttelten Beton im Bereich bis rd. 1,5 cm Tiefe im Mittel noch auf rd. 0,15 mm entsprechend zum steigenden Luftporengehalt ab, wurde also noch günstiger. In noch größerer Entfernung von der oberen Fläche wurde der Abstandsfaktor des erstmalig gerüttelten und des nachgerüttelten Betons im Mittel zu rd. 0,18 mm erhalten.

Eine bestimmtere Aussage über den Abstandsfaktor des nicht nachgerüttelten Betons im Bereich von 0,5 bis 2,5 cm erscheint nicht angebracht, da die gemessenen Werte stark streuen und somit keinen erklärbaren Zusammenhang aufweisen.

Der Zementleimgehalt des erstmalig gerüttelten und des nachgerüttelten Betons lag bei rd. 24 Stoffraum-‰, er nahm in den oberen 1,5 cm beim erstmalig gerüttelten Beton auf 35 ‰ und beim nachgerüttelten auf 42 ‰ zu.

### 3.2.2 Nachrütteln auf dem Rütteltisch

Der Einfluß eines Nachrüttelns auf dem Rütteltisch wurde entsprechend an den Platten 61 cm x 61 cm x 15 cm untersucht. Die Platten wurden auf einem Rütteltisch erstmalig gerüttelt und auch nachgerüttelt. Während des Nachrüttelns lag auf der oberen Fläche des Betons eine Stahlplatte mit einem Gewicht von rd. 0,02 kp/cm<sup>2</sup>, damit während des Nachrüttelns die obere Fläche geschlossen blieb.

Nach Bild 2 lag gegenüber dem im Drucktopf nach dem Mischen gemessenen Luftporengehalt von 6,5 ‰ (Beton für erstmalig gerüttelte Platte) und von 6,4 ‰ (Beton für nachgerüttelte Platte) der Luftporengehalt in den beiden Platten mit rd. 5,6 ‰ bzw. 6 ‰ im ganzen nur wenig niedriger. Nur an der oberen, ebenfalls mit der Kelle geglätteten Fläche ging der Luftporengehalt auf 4,0 ‰ bzw. 4,6 ‰ zurück.

Der Abstandsfaktor ergab sich bei beiden Platten nur mit geringen Unterschieden; er lag im günstigen Bereich, und zwar an der oberen Fläche bei einem errechneten Mittel von rd. 0,165 mm, in rd. 2,5 cm Tiefe bei rd. 0,145 mm und in Plattenmitte sowie tiefer bei rd. 0,155 mm (auch beim Vergleich dieser Werte muß beachtet werden, daß es sich nur um Messungen an einigen wenigen Stellen handelt und Unterschiede durch Ungleichmäßigkeiten im Plattenquerschnitt und durch Meßstreuungen eingeschlossen sind).

Zusammenfassend kann trotzdem folgendes festgestellt werden:

- a) Gegenüber dem im Drucktopf nach dem Mischen gemessenen Luftporengehalt war der Verlust an Luftporen beim Verdichten

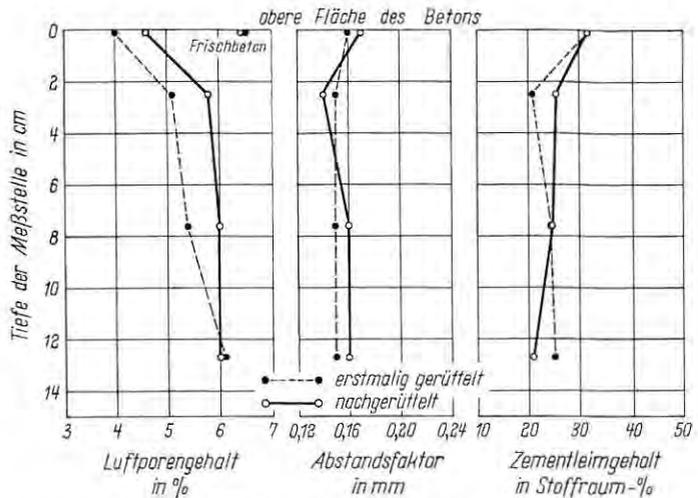


Bild 2 Luftporengehalt, Abstandsfaktor und Zementleimgehalt von zwei auf dem Rütteltisch erstmalig gerüttelten 15 cm dicken Betonplatten 61 cm × 61 cm, eine Platte zusätzlich auf dem Rütteltisch nachgerüttelt; Messungen in 4 verschieden tief liegenden Zonen (Luftporengehalt des Betons im Drucktopf nach dem Mischen 6,5% bzw. 6,4%)

mit dem Innenrüttler größer als beim Verdichten auf dem Rütteltisch,

- b) obwohl der Zementleimgehalt an der oberen Fläche der mit Innenrüttlern erstmalig gerüttelten bzw. mit der Rüttelbohle nachgerüttelten Platte stark anstieg und der Luftporengehalt zurückging, lagen noch günstige Werte für den Abstandsfaktor vor (dabei muß allerdings beachtet werden, daß der Ausgangsluftporengehalt des Betons mit 5,8% hoch war),
- c) durch Nachrütteln, sowohl mit einer Rüttelbohle als auch auf einem Rütteltisch, ändert sich der Luftporengehalt nahe der oberen Fläche gegenüber dem nicht nachgerüttelten Beton nur unwesentlich. In einer Tiefe von 0,5 bis 3 cm stieg der Luftporengehalt wieder an, und der Abstandsfaktor wurde kleiner (günstiger).

### 3.3 Beständigkeit und Festigkeit

Gegen eine Frost-Tausalz-Beanspruchung (Einfrieren und Auftauen einer 4%igen Calciumchloridlösung) erschienen die mit der Rüttelbohle nachgerüttelten Platten und die auf dem Rütteltisch nachgerüttelten Platten und Balken im allgemeinen etwas widerstandsfähiger (statistisch konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen dem Frost-Tausalz-Widerstand eines nachgerüttelten und dem eines nicht nachgerüttelten Betons festgestellt werden).

Der Frost-Tausalz-Widerstand des Betons ohne Verzögerer war etwas höher als der des Betons mit Verzögerer.

Die Druckfestigkeit wurde an Balken 15 cm x 15 cm x 45 cm geprüft, die auf dem Rütteltisch erstmalig gerüttelt und nachgerüttelt wurden. Die Druckfestigkeit des verzögerten Betons wurde durch das Nachrütteln nicht beeinflusst, die des nicht verzögerten Betons jedoch etwas erhöht.

Die Dichte des Betons und der Abnutzwiderstand wurden durch das Nachrütteln nur geringfügig und unterschiedlich verändert, so daß kein signifikanter Unterschied zwischen nachgerütteltem und nicht nachgerütteltem Beton festgestellt werden konnte.

#### **4. Feststellungen aus Feldversuchen**

Ähnliche Versuche wurden bei der Herstellung von drei Brückenfahrbahnplatten durchgeführt. Der Luftporenbeton wurde mit einer Rüttelbohle nachgerüttelt, nachdem die Versteifung einem Eindringwiderstand von ungefähr 1,8 kp/cm<sup>2</sup> entsprach.

Risse, die durch das Nachrütteln zu schließen gewesen wären, hatten sich nicht gebildet. Die Feldversuche werden daher in erster Linie nur Aufschluß geben können, wie sich das Nachrütteln auf die Festigkeit und Beständigkeit des Betons der Fahrbahnplatten auswirkt. Zunächst wurde folgendes herausgestellt: Außer einem Besenstrich war ein Nacharbeiten der oberen Fläche nach dem Nachrütteln nicht mehr möglich, da der Beton zu stark versteift war. Eine Oberflächenbearbeitung (wie z. B. Abgleichen von Unebenheiten) muß deshalb zeitig vor dem Nachrütteln durchgeführt werden.

Die Rüttelbohle soll nicht frei auf der Betonfläche aufliegen, sondern in ihrer Höhenlage geführt werden, weil sie sonst in den Beton einsinkt und eine unebene Fläche hinterlassen kann. Es ist dafür zu sorgen, daß eine nach dem Wasserabsondern ggf. entstandene steifere Kruste wieder vollkommen eingerüttelt wird.

Eine abschließende Beurteilung der Feldversuche kann erst nach einer mehrjährigen Beobachtung der Brückenplatten gegeben werden.

#### **5. Zusammenfassung**

Folgende Schlüsse werden aus den Versuchen gezogen:

5.1 Innenrüttler können für ein Nachrütteln von Platten nicht verwendet werden, wenn der Beton bereits deutlich versteift ist.

5.2 Mit einer kräftigen Rüttelbohle können senkrechte Risse über den oben liegenden Bewehrungsstäben, horizontale Risse in der Ebene der Bewehrung und innere Risse (Schrumpfrisse) bis zu einer Tiefe von mindestens 10 cm geschlossen werden. Das Nachrütteln muß durchgeführt werden, bevor der Eindringwiderstand größer als rd. 4 kp/cm<sup>2</sup> ist. Die Rüttelenergie ist dann groß genug, wenn sich noch ein Feuchtigkeitsfilm auf der oberen Fläche bildet.

5.3 Nach dem Nachrütteln ist außer einem Besenstrich keine Oberflächenbearbeitung mehr möglich.

5.4 Nachrütteln kann die Beständigkeit der Oberfläche geringfügig erhöhen. Der wichtige Abstands faktor des Luftporenbetons wird nur bis zu einer Tiefe von etwa 0,5 cm durch das Nachrütteln sehr geringfügig erhöht (verschlechtert).

5.5 Gegenüber dem Ausgangsluftporengehalt nach dem Mischen nahm der Luftporengehalt des Betons der Platten nach dem erstmaligen Rütteln mit dem Innenrüttler um rd. 1,5 % und auf dem Rütteltisch um rd. 1,0 % ab. (Dazu könnte angenommen werden, daß dieser weich angemachte Beton bei der Bestimmung des Ausgangsluftporengehaltes im Drucktopf nach ASTM-C 231-66 nur durch Stochern verdichtet wurde, was jedoch aus dem Originalbericht nicht eindeutig hervorgeht.)