

Einfluß und Bestimmung der Eigenfeuchte von Betonzuschlagstoffen

Von Gerd Wischers und Ottokar Hallauer, Düsseldorf

Übersicht

Die Eigenfeuchte des Zuschlags, das ist sein Gesamtwassergehalt bezogen auf das Gewicht des trockenen Zuschlags, besteht aus der Kernfeuchte in den Poren des Gesteins und aus der Oberflächenteuchte auf und zwischen den einzelnen Körnern. Als Anmachwasser wirkt nur die Oberflächenteuchte. Schwankungen in der Oberflächenteuchte müssen bei der Betonherstellung berücksichtigt werden, weil sonst die Konsistenz und die Festigkeit des Betons sehr unterschiedlich entstehen. (Eine um 1 Gew.-% größere Eigenfeuchte bewirkt ohne Verminderung des Zugabewassers eine um rd. 15% kleinere Festigkeit.)

An verschiedenen Kornfraktionen aus Rhein-, Main- und Moräne-Kiessand wurden im Otto-Graf-Institut, Stuttgart, und im Zementforschungsinstitut, Düsseldorf, der Gesamtwassergehalt und – soweit möglich – die Kern- und Oberflächenteuchte durch Trocknen bei 105 °C, mit dem Luftpiknometer, mit dem CM-Gerät und mittels elektrischer Widerstandsmessungen bestimmt. Durch Trocknen kann man den Gesamtwassergehalt zuverlässig ermitteln, Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert sind meist kleiner als 0,1 Gew.-%. Bezogen auf den Gesamtwassergehalt durch Trocknen kann man mit dem Luftpiknometer den Wassergehalt mit einer mittleren Abweichung von etwa $\pm 0,3$ Gew.-% bestimmen; in Einzelfällen war der Unterschied größer. Die gleiche Genauigkeit wies das CM-Gerät bei der Wassergehaltsbestimmung von Sand auf. Mit der im Otto-Graf-Institut gebauten Meßeinrichtung für den elektrischen Widerstand konnte der Wassergehalt nicht so genau erfaßt werden, weil der elektrische Widerstand nicht nur von der Feuchtigkeit, sondern auch von der Schüttdichte, der Kornzusammensetzung und der mineralischen Beschaffenheit des Zuschlags beeinflußt wird.

Unter der Voraussetzung, daß die Kornzusammensetzung des Zuschlags und das Mischungsverhältnis gleich bleiben, kann man die Eigenfeuchte des Zuschlags auch beim Mischen des Betons durch elektrische Widerstandsmessung des Frischbetons oder durch Konsistenzmessung, z.B. durch die Leistungsaufnahme des Mischermotors, berücksichtigen. Auch diese Verfahren sind noch nicht so weit entwickelt, daß die Herstellung eines gleichmäßigen Betons aus Zuschlagstoffen unterschiedlicher Herkunft und Eigenfeuchte ohne Überwachung bzw. Feinsteuerung durch den Maschinisten möglich ist.

1. Allgemeines

Für den Bauausführenden sind die Konsistenz des Frischbetons und die Festigkeit des erhärteten Betons besonders wichtig, weil sie maßgebend für ein vollständiges Verdichten des Betons in der Schalung und für die Standsicherheit des fertigen Bauwerks sind. Liegt die Betonzusammensetzung, mit der diese beiden Eigenschaften erfüllt werden, an Hand einer Eignungsprüfung fest, dann braucht man auf der Baustelle nur noch die Ausgangsstoffe hinreichend genau abzumessen. Während dies beim Zement einfach möglich ist, bereitet das Abmessen der Zuschlagstoffe wenig, das des Wassers größere Schwierigkeiten, weil der Zuschlag schwankende Gehalte an Wasser – die sogenannte Eigenfeuchte – aufweisen kann, die beim Abmessen des Zuschlags zu berücksichtigen sind und die man auf das Anmachwasser anrechnen muß.

Als Eigenfeuchte bezeichnet man den Gesamtwassergehalt des Zuschlags, bezogen auf sein Trockengewicht. Die Eigenfeuchte des Zuschlags setzt sich aus der Oberflächenfeuchte und der Kernfeuchte zusammen [1]. Die Oberflächenfeuchte besteht je nach Wassergehalt eines Korngemisches aus dem Wasserfilm auf der Oberfläche eines jeden Zuschlagkorns und dem Zwickelwasser an den Berührungsstellen der einzelnen Körner, bei sehr nassem, feinem Sand auch aus dem Wasser in den Hohlräumen zwischen den Sandkörnern. Die Kernfeuchte befindet sich in den Poren des Gesteins. Die Eigenfeuchte von im Freien gelagertem Zuschlag 0/30 mm schwankt je nach Witterung, Kornzusammensetzung und Gesteinsart zwischen rd. 2 und 6 Gew.-%, d. h. bei rd. 1900 kg/m³ Zuschlag zwischen rd. 35 und 115 l Wasser je m³ verdichteten Betons.

Wird die Eigenfeuchte beim Abwiegen des Zuschlags nicht berücksichtigt, so enthält der Beton mit zunehmender Eigenfeuchte weniger festen Zuschlag je m³ als vorausgesetzt. Der Beton erreicht dann bei gleicher Konsistenz etwas höhere Festigkeit, da das Mischungsverhältnis zugunsten des Zements verändert wird. Dabei entsteht ein Mehrverbrauch an Zement von etwa 2 bis 5 %. Gibt man jedoch eine mittlere Eigenfeuchte der Zuschläge beim Einstellen der Verwiegeanlage vor, z. B. für Sand 0/3 mm 4 Gew.-%, Sand 3/7 mm 2,5 Gew.-% und Kies 7/30 mm 1,5 Gew.-%, dann sind die Abmeßfehler des Zuschlags und die Änderungen im Zementgehalt vernachlässigbar klein. Beim Abmessen des Zuschlags nach Gewicht bereitet eine schwankende Eigenfeuchte somit keine Schwierigkeiten, im Gegensatz zu einem Abmessen nach Raumteilen, da die Schüttdichte des Sandes sich mit der Eigenfeuchte stark verändern kann.

Aber selbst bei gewichtsmäßiger Vorgabe einer mittleren Eigenfeuchte wirkt sich bei konstanter Zugabe-Wassermenge eine schwankende Eigenfeuchte noch merkbar auf den Gesamtwassergehalt des Betons und damit auf die Konsistenz und den Wasserzementwert aus. Unter durchschnittlichen Verhältnissen bewirkt z. B. ein Anstieg der Eigenfeuchte um 1 Gew.-% einen Anstieg der Konsistenz K2 (rd. 38 cm Ausbreitmaß) auf K3 (rd. 48 cm Ausbreitmaß), einen Anstieg des Wasserzementwerts um rd. 0,06 und damit eine Minderung der Festigkeit um mehr

als 15 %. Deshalb soll die Eigenfeuchte des Zuschlags während des Betonierens bei der Wasserzugabe laufend berücksichtigt werden.

Als Anmachwasser wirkt nicht der Gesamtwassergehalt (die Eigenfeuchte) des Zuschlags, sondern nur die Oberflächenfeuchte. Wird daher bei einer Prüfung der Gesamtwassergehalt bestimmt, z. B. durch Trocknen bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz, dann ist die Kernfeuchte hiervon abzuziehen und nur die Differenz (= Oberflächenfeuchte) anzurechnen. Die Kernfeuchte ist für gleichbleibenden Zuschlag eines bestimmten Vorkommens annähernd konstant (Gesteinseigenschaft), so daß sie nur in größeren zeitlichen Abständen oder bei augenscheinlicher Veränderung des Zuschlags zu bestimmen ist.

Zur Berücksichtigung der Oberflächenfeuchte des Zuschlags beim Betonieren sind schon vor Jahren verschiedene Verfahren vorgeschlagen worden. Direkte Verfahren bestimmen den Gesamtwassergehalt oder die Oberflächenfeuchte unmittelbar [2], indirekte Verfahren machen die Menge des noch zuzugebenden Wassers von einer Konsistenzmessung [3, 4], neuerdings auch einer Messung des elektrischen Widerstands im Mischer abhängig.

Nach einem Überblick über die direkten Verfahren werden im folgenden einige Verfahren zur Bestimmung des Gesamtwassergehalts bzw. der Kern- und Oberflächenfeuchte kritisch einander gegenübergestellt¹⁾. Unter Einbeziehung der indirekten Verfahren werden anschließend Empfehlungen für ein möglichst einfaches Messen und Berücksichtigen der Oberflächenfeuchte auf der Baustelle und im Betonwerk gegeben.

2. Direkte Verfahren zur Bestimmung der Eigenfeuchte [2, 5, 6]

Das bekannteste und älteste Verfahren zur Bestimmung der Eigenfeuchte ist das *Trocknen* in beheizten Gefäßen, in einem Warmluftstrom, durch Infrarotstrahlung oder durch andere Wärmequellen. Die Eigenfeuchte ergibt sich aus der Gewichts-differenz von feuchter und getrockneter Probe bezogen auf das Trockengewicht der Probe. Der Gesamtwassergehalt (Oberflächen- plus Kernfeuchte) läßt sich durch Trocknen zuverlässig bestimmen, dagegen ist das Bestimmen der Oberflächenfeuchte mit Schwierigkeiten verbunden (siehe Abschnitt 3.1).

Das Meßprinzip der *Verdrängungsverfahren* zur Bestimmung der Eigenfeuchte beruht darauf, daß ein feuchtes Korngemisch einen größeren Raum einnimmt als ein trockenes. Gemessen wird in einem geeichten Meßgefäß entweder der verbleibende Hohlraum durch eine Flüssigkeit (Wasserypknometer) oder durch Luft (Luftypknometer). Dabei muß die Kornrohddichte des Gemisches genau bekannt sein. Setzt man die Dichte des oberflächentrockenen, jedoch kerngesättigten Korngemisches in die

¹⁾ Ein Teil der zugehörigen Untersuchungen wurde im Auftrag des Forschungsinstituts der Zementindustrie von der Amtlichen Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, Otto-Graf-Institut, an der TH Stuttgart, Abt. Erd- und Grundbau, durchgeführt [5].

zugehörige Gleichung ein, dann erhält man direkt die Oberflächenfeuchte (siehe Abschnitt 3.2).

Bei den *chemischen Verfahren* zur Bestimmung der Eigenfeuchte mißt man die Reaktion einer Substanz mit der Eigenfeuchte. Am bekanntesten ist die Calciumcarbid-Methode (CM-Gerät), bei der man in einem geeichten Druckgefäß den Druck des je nach Wassermenge entstehenden Acetylgases mißt und daraus den Wassergehalt erhält. Bei stets erforderlichem Calciumcarbidüberschuß beteiligt sich die gesamte Oberflächenfeuchte an der Reaktion; welche Anteile der Kernfeuchte sich in der kurzen Prüfzeit ebenfalls beteiligen, hängt u. a. von der Größe des Zuschlagkorns, der Porosität und der Durchlässigkeit des Gesteins ab (siehe Abschnitt 3.3).

Das Messen des *elektrischen Leitungswiderstandes* zur Bestimmung der Eigenfeuchte beruht darauf, daß der Widerstand des Wassers im Vergleich zu der des Gesteins relativ niedrig ist. An der elektrischen Leitung beteiligen sich die Oberflächen- und die Kernfeuchte, vermutlich jedoch in verschieden hohem Maße. Die Lagerungsdichte beeinflusst den elektrischen Widerstand ebenso wie etwaige gelöste Salze verhältnismäßig stark. Das Aufstellen von Eichkurven zwischen Widerstand und Eigenfeuchte ist auch deswegen schwierig, weil sich unterschiedliche Werte ergeben, je nachdem, ob beim Eichen mit einem bestimmten Zuschlag vom trockenen oder vom feuchten Bereich ausgegangen wird [5] (siehe Abschnitt 3.4).

Bei den *Absorptionsmethoden* zur Bestimmung der Eigenfeuchte mißt man die Minderung der Strahlungsintensität von Neutronen oder von elektromagnetischen Zentimeterwellen (Mikro-Wellen). Die Messungen werden von der Lagerungsdichte stark beeinflusst. Die Absorption der Neutronen hängt zudem von der chemischen Zusammensetzung des Zuschlags, die der Mikro-Wellen von löslichen Stoffen ab. An der Absorption beteiligen sich die Oberflächen- und die Kernfeuchte.

Zur Bestimmung der Eigenfeuchte werden ferner *Dichtemessungen von Salzlösungen* (Verdünnung der Lösung durch die Eigenfeuchte), *Colorimetrische Messungen* (Veränderungen von Farblösungen durch die Eigenfeuchte), Messungen der *Wärmeleitfähigkeit* (Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Eigenfeuchte) sowie Messungen der *relativen Feuchtigkeit* eingebetteter Meßkörper (Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit oder Längenänderung) herangezogen.

3. Oberflächen- und Kernfeuchte verschiedener Zuschlagstoffe

Untersucht wurden am Otto-Graf-Institut in Stuttgart jeweils getrennt in den Korngruppen 0/3, 3/7 und 7/15 mm

Moräne-Kiessand aus Baltringen, Kreis Biberach,

Main-Kiessand aus Thüngersheim bei Würzburg

und am Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf in verschiedenen Korngruppen bis 30 mm

Rhein-Kiessand aus der näheren Umgebung von Düsseldorf.

Der Moräne-Kiessand bestand im wesentlichen aus Kalksteinen; er war sehr gerundet und hatte relativ glatte Oberflächen. Der Main-Kiessand enthielt überwiegend Sandsteine, ferner Feuersteine und Quarze; er war weniger gerundet und enthielt auch scharfkantige Geröllbruchstücke; seine Oberfläche war im allgemeinen rau, zum Teil unregelmäßig kerbig. Der Rheinsand 0/3 mm bestand überwiegend aus Quarz, er war gedrunen und größtenteils gerundet. Der Rhein-Kiessand 3/30 mm enthielt zu etwa 60 % Sandsteine, der Rest bestand überwiegend aus Quarz. Die Sandsteine waren im allgemeinen gerundet, wenn auch häufig von länglicher oder plattiger Form; ihre Oberfläche war mäßig rau. Die Quarzkörner waren überwiegend von einzelnen Grobporen durchsetzt und vielfach gebrochen; ihre Form war meist gedrunen und bis auf die Bruchflächen sehr gerundet. Ihre Oberfläche war glatt, an den Bruchflächen sehr rau. Ein kleiner Anteil der Quarzkörner war sehr dicht, sehr gerundet und sehr glatt.

3.1 Bestimmung der Kern- und Oberflächenfeuchte durch Trocknen

Im Otto-Graf-Institut [5] wurden die Zuschlagstoffproben zunächst 24 Stunden unter Wasser gelagert, dann wurden 500 g der Sande 0/3 mm oder 1 kg der Proben > 3 mm in eine geneigte, flache Schale gegeben, die auf einer Waage stand und sich mit 25 U/min drehte. Ein Heißlüfter blies aus rd. 60 cm Entfernung warme Luft in die Schale, ein Thermometer über der Schale zeigte die Temperatur an, siehe Bild 1. Mitnehmer (Schikanen) in der

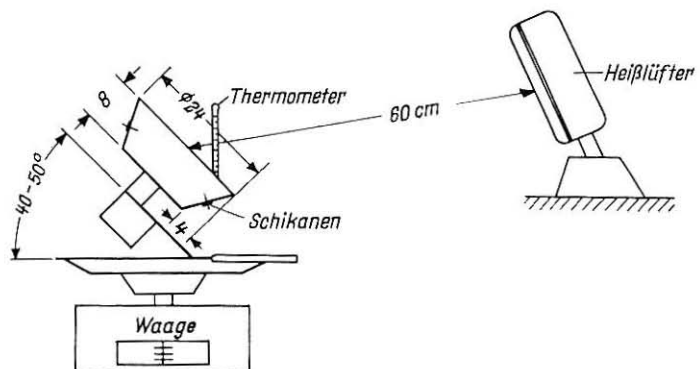


Bild 1 Versuchsanordnung zur kontinuierlichen Bestimmung des verdampften Wassers beim Trocknen im Warmluftstrom [5]

Schale, bzw. ein feststehender Dorn, bewirkten ein gutes und gleichmäßiges Durchmischen. Die Lufttemperatur über der geneigten, rotierenden Schale betrug 48 °C. Im Abstand von etwa 3 bis 5 Minuten wurden die Rotation und die Wärmezufuhr unterbrochen und eine Wägung vorgenommen. Dieses Verfahren wurde so lange durchgeführt, bis sich innerhalb von 5 Minuten keine Gewichtsabnahme mehr ergab. Dieser Zustand trat nach knapp

2 Stunden ein. Anschließend stellte man die Restkernfeuchte durch Trocknen bei 105 °C fest.

In Bild 2 ist der Gesamtwassergehalt der beiden Zuschlagstoffarten jeweils für die Korngruppen 0/3, 3/7 und 7/15 mm über der Zeit aufgetragen. Die Entwässerungskurven der Korngruppen 3/7 und 7/15 waren für die beiden Zuschläge jeweils prak-

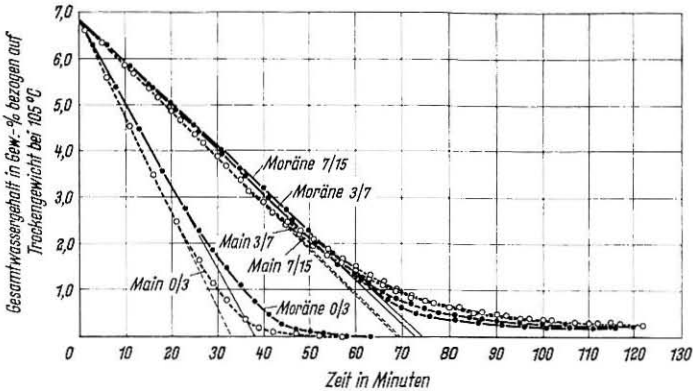


Bild 2 Abnahme des Gesamtwassergehalts in der Zeit durch Trocknen im Warmluftstrom [5]

tisch gleich. Auch die des Sandes 0/3 mm entsprachen diesem Verlauf. (Die Wasserabgabe des Sandes je Zeiteinheit erscheint in Bild 2 doppelt so groß, weil bei konstanter Trocknungsenergie nur die Hälfte eingewogen war.)

Mit Beginn der Trocknung nahm der Wassergehalt zunächst proportional zur Zeit ab. Die Wasserabgabe je Zeiteinheit des oberflächenglatten Moräne-Kiessandes war bei gleicher Trocknungsenergie etwas kleiner als die des oberflächenrauh Main-Kiessandes. War der Gesamtwassergehalt des Main-Kiessandes auf rd. 2,8 Gew.-% gesunken, dann verlangsamte sich die Wasserabgabe je Zeiteinheit, d. h. die Geraden gingen in Kurven über. Beim Moräne-Kiessand > 3 mm ging die Gerade erst bei einem Gesamtwassergehalt von rd. 1,6 Gew.-% in eine Kurve über, beim Moränesand 0/3 mm hingegen schon bei 3,4 Gew.-% Wassergehalt. Durch Augenschein wurde festgestellt, daß beim Übergang der Geraden in die Kurve die ersten Körner des Gemisches oberflächentrocken wurden (hellere Farbe), daß also der größte Teil der Oberflächenfeuchte abgetrocknet war [4,5].

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden die verschiedenen Korngruppen des Rhein-Kiessandes nach vorheriger 24-stündiger Wasserlagerung in ähnlicher Weise getrocknet. In einer flachen Stahlpfanne wurden Mengen von 3 bis 4 kg unter ständigem Rühren von Hand dem Warmluftstrom eines Heizlüfters ausgesetzt, der so eingestellt war, daß sich die Zuschlagstoffproben während des Trocknens nicht erwärmten, um ein Verdampfen

der Kernfeuchte möglichst zu vermeiden. Diese Trocknung wurde bei den Korngruppen > 3 mm so lange fortgesetzt, bis die Oberflächenfeuchte nach Augenschein verdunstet war. Dieser Zustand war nicht scharf feststellbar, weil die Zuschlagkörner aus Quarz wesentlich rascher abtrockneten als die aus Sandstein. Anschließend wurde die in den Körnern verbliebene Kernfeuchte durch Trocknen bei 105°C ermittelt.

Während das Abtrocknen der Kornoberfläche bei den größeren Zuschlagkörnern durch die farbliche Veränderung (heller werden) gut zu beobachten ist, läßt sich beim Sand 0/3 mm dieser Farbumschlag nicht feststellen. Da Sand, dessen Körner von einem wässerigen Oberflächenfilm umgeben sind, „klebt“, kann man an dieser Eigenschaft feststellen, ob der Sand noch oberflächenfeucht ist oder nicht. In Anlehnung an die amerikanischen Prüfvorschriften ASTM C 128–59 (Specific gravity and absorption of fine aggregate) und ASTM C 70–47 (Surface moisture in fine aggregate) wird der Sand hierzu in 2 Lagen in eine Kegelform (unterer Durchmesser rd. 95 mm, oberer Durchmesser rd. 40 mm, Höhe rd. 75 mm) leicht eingestampft, die anschließend langsam senkrecht nach oben abgezogen wird. Bleibt der Sandkegel dann stehen, so ist der Sand noch oberflächenfeucht, anderenfalls fließt er auseinander (Bild 3). Nähert man sich beim Trocknen dem Zeitpunkt, an dem die Oberflächenfeuchte verdunstet ist, dann sollte man die Temperatur des Luftstroms senken und den Kegel-Stand-Versuch in kurzen Abständen – etwa alle Minute – wiederholen, um den Übergang vom standfesten zum fließenden



Bild 3 Bestimmung der Kernfeuchte von Sand mit dem Kegel-Stand-Versuch. Der linke Sandkegel ist standfest und enthält noch Oberflächenfeuchte; der rechte Kegel zerfällt beim Ziehen der Form, der Sand ist oberflächentrocken

Kegel möglichst genau zu erfassen. Die verbleibende Kernfeuchte wird anschließend im Trockenschrank bei 105 °C bestimmt.

In Tafel 1 ist die so ermittelte Kernfeuchte der verschiedenen Korngruppen aus Rhein-Kiessand zusammengestellt. Die Kernfeuchte jeder Korngruppe wurde drei- oder viermal an verschiedenen Tagen bestimmt. Dabei zeigte sich, daß der oberflächentrockene, jedoch kernfeuchte Zustand des Sandes 0/3 mm mit dem Kegel-Stand-Versuch hinreichend genau erfaßt werden kann,

Tafel 1 Kernfeuchte von Rhein-Kiessand verschiedener Korngruppen

Trocknung im warmen Luftstrom; Beurteilung des oberflächentrockenen, kernfeuchten Zustands nach Augenschein

Korngruppe	Kernfeuchte in Gew.-% bezogen auf Trockengewicht				
	Versuch Nr.				Mittel
	1	2	3	4	
0/3 mm	0,75	0,75	0,55	0,69	0,7
3/7 mm	1,18	1,05	1,26	—	1,2
7/15 mm	1,07	0,97	1,54	—	1,2
15/30 mm	0,58	0,72	1,11	1,45	1,0

denn die Einzelmessungen weichen vom Mittelwert kaum mehr als 0,1 % ab. Demgegenüber bereitet es anscheinend größere Schwierigkeiten, diesen Zustand bei den größeren Korngruppen lediglich nach Augenschein zu beurteilen, so daß bei der Korngruppe 15/30 mm Abweichungen vom Mittelwert von über 0,4 % auftraten. Dabei ist allerdings zu beachten, daß der Wassergehalt dieser Korngruppe an sich nicht so bedeutend ist.

Aus diesem Grunde ist es angebracht, die Kernfeuchte von Zuschlagkorngruppen > 3 mm dadurch zu bestimmen, daß man jedes einzelne Korn nach Wassersättigung auf Fließpapier oder ganz schwach feuchten Leinentüchern so lange hin und her wälzt oder vorsichtig abputzt, bis die Oberfläche nur noch schwach mattfeucht schimmert, und dann bei 105 °C trocknet. Gleichzeitig kann man den Zuschlag dabei in seine Gesteinsarten unterteilen. Im Otto-Graf-Institut wurden auf diese Weise je 100 Zuschlagkörner 7/15 mm und im Zementforschungsinstitut rd. 6,0 kg Rhein-Kies 15/30 mm untersucht. Die Ergebnisse sind in Tafel 2 zusammengestellt. Die mittlere Kernfeuchte des Moräne-Kieses betrug danach 0,8 %, die des Main-Kieses hingegen 2,8 % und die des Rhein-Kieses 1,2 %. Bemerkenswert ist der sehr große Unterschied in der Kernfeuchte verschiedener Gesteinsarten in einem Zuschlag gleicher Herkunft. Unabhängig von der Herkunft wurde eine Kernfeuchte für Quarz um 0,3 bis 0,4 %, für Sandstein zwischen 2,0 und 2,8 % und für Kalkstein um 0,6 % gefunden.

Tafel 2 Kernfeuchte von Moräne-, Main- und Rheinkies (Abtupfen der Oberflächenfeuchte mit Fließpapier)

Moränekies 7/15 mm			Mainkies 7/15 mm			Rheinkies 15/30 mm		
Gesteinsart	Anteil	Kernfeuchte	Gesteinsart	Anteil	Kernfeuchte	Gesteinsart	Anteil	Kernfeuchte
	%	Gew.-%		%	Gew.-%		%	Gew.-%
Kalksteine	59	0,56	Sandsteine	68	2,80	Grüne Sandsteine	18	1,99
Metamorphe G.	16	0,97	Feuersteine	19	3,70	Graue Sandsteine	20	2,16
Sandsteine	12	2,22	Quarze	9	0,35	Rote Sandsteine	8	2,01
Kieselkalke	5	0,83	Kieselknollen	2	13,29	Sandsteine mit Quarzeinschlüssen	4	1,33
Quarze	5	0,44	Gneis	1	2,58	Gebrochener Quarz	31	0,31
Dolomite	3	0,83	Tonschiefer	1	0,39	Dichter Quarz	5	0,04
						Sonstiges Gestein	14	0,59
Mittel		0,83			2,82			1,19

3.2 Bestimmung des Gesamtwassergehalts und der Oberflächenfeuchte mittels Luftpyknometer

Sind die Rohdichte des feuchten Zuschlags ρ_{Gf} ²⁾ und die des trockenen Zuschlags ρ_{Gt} bekannt, dann errechnet sich der Gesamtwassergehalt des Zuschlags nach der Gleichung

$$\text{Gesamtwassergehalt} = \frac{\rho_{Gt} - \rho_{Gf}}{\rho_{Gt}(\rho_{Gf} - 1)} \cdot 100 \text{ [Gew.-%]} \quad (1)$$

Setzt man in Gleichung (1) für ρ_{Gt} die Rohdichte des oberflächentrockenen, jedoch kernfeuchten Zuschlags ρ_{Gk} ein, dann liefert die Gleichung (2) direkt die Oberflächenfeuchte, allerdings bezogen auf den kernfeuchten Zuschlag.

$$\text{Oberflächenfeuchte} = \frac{\rho_{Gk} - \rho_{Gf}}{\rho_{Gk}(\rho_{Gf} - 1)} \cdot 100 \text{ [Gew.-%]} \quad (2)$$

Mit dem Luftpyknometer (Bild 4) kann man verhältnismäßig einfach das Volumen des trockenen oder feuchten Zuschlags bestimmen (im zweiten Fall als Summe der Volumen aus Zuschlag und Feuchte). Hierzu wird in einer Kammer des Geräts ein bestimmter Überdruck, meist 23 m Wassersäule, durch eine Luftpumpe erzeugt. Anschließend mißt man, welcher Druck sich einstellt, wenn man ein Ausgleichsventil zwischen der Kammer

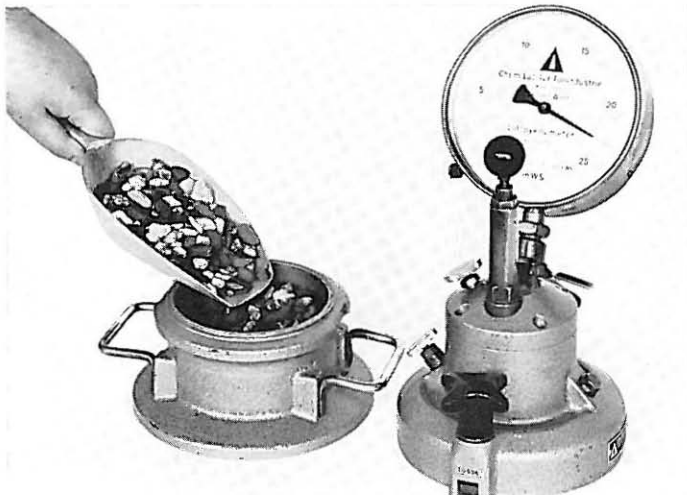


Bild 4 Einfüllen von feuchtem Zuschlag 7/15 mm in den Behälter des Luftpyknometers. Am Deckel des Geräts sind die Druckluftkammer, ein Manometer, eine Luftpumpe und das Ausgleichsventil angeordnet

²⁾ Die Rohdichte des feuchten Zuschlags ist eine fiktive Größe, die sich durch Division der Masse (Gewicht) von Gestein plus Wasser durch den Raum ergibt, den Gestein plus Wasser einnehmen.

und einem Behälter bekannter Größe mit dem Zuschlag öffnet. Das Volumen der Probe ergibt sich direkt aus einer Eichkurve in Abhängigkeit vom Ausgleichdruck; Näheres siehe [6]. Die Bestimmung dauert etwa 15 Minuten.

Aus dem Quotienten des Gewichts der feuchten Probe und dem im Luftpyknometer bestimmten Volumen errechnet sich die Rohdichte des feuchten Zuschlags ρ_{Gf} . Sind die für einen Zuschlag gleicher Herkunft praktisch konstanten Rohdichten des trockenen Zuschlags ρ_{Gt} und des kernfeuchten Zuschlags ρ_{Gk} vorab ermittelt worden, dann genügt es, für weitere Messungen nur noch die Dichte des jeweiligen feuchten Zuschlags zu bestimmen, um daraus den jeweiligen Gesamtwassergehalt nach Gleichung (1) oder die Oberflächenfeuchte nach Gleichung (2) zu errechnen.

Nach den Gleichungen (1) und (2) errechnen sich der Gesamtwassergehalt und die Oberflächenfeuchte im wesentlichen aus der Differenz der Dichten, d.h. aus einer kleinen Differenz relativ großer Zahlen. Die Rohdichten müssen daher sehr genau ermittelt werden; ein kaum zu vermeidender Fehler in der Rohdichte von $0,01 \text{ g/cm}^3$ bewirkt bei der Berechnung der Oberflächenfeuchte einen Fehler von etwas über $0,2 \text{ Gew.-%}$. Bei

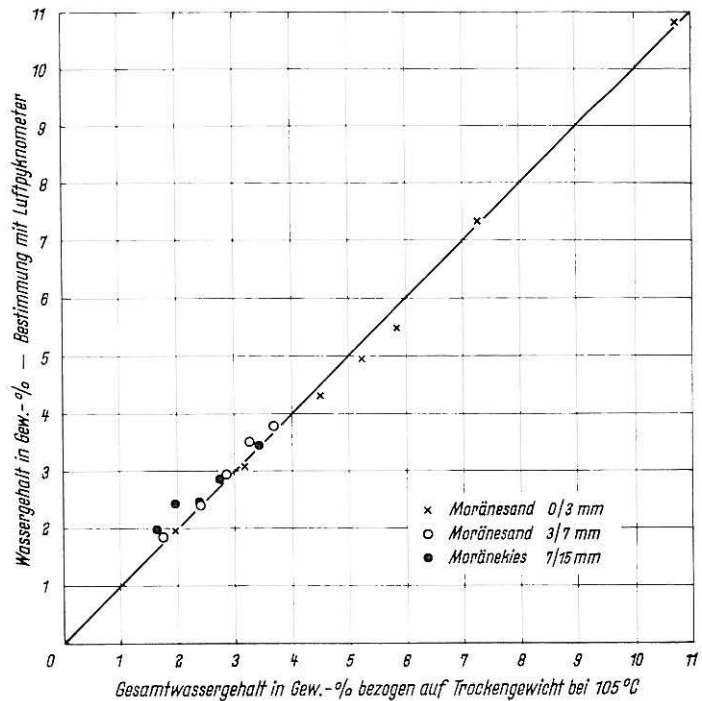


Bild 5 Bestimmung des Wassergehalts mit dem Luftpyknometer im Vergleich zum Gesamtwassergehalt durch Trocknen [5]

einer Einwaage im Luftpyknometer von rd. 1,5 kg muß daher das Gewicht der Probe auf 1 g und das Volumen auf 1 cm³ genau erfaßt werden. Da der Ausgleichsdruck allenfalls auf 0,01 m Wassersäule geschätzt werden kann, ist diese Messung an der gleichen Probe wenigstens dreimal zur Mittelbildung zu wiederholen [6] (im Zeitaufwand von 15 min einbegriffen).

Im Otto-Graf-Institut wurden verschieden große Gesamtwassergehalte von Proben aus Moräne- und Main-Kiessand vergleichsweise mit dem Luftpyknometer und durch Trocknen bei 105 °C bestimmt. In Bild 5 sind auf der Abszisse die durch Trocknen und auf der Ordinate die mittels Luftpyknometer bestimmten Wassergehalte von Moräne-Kiessand-Proben aufgetragen. Wie aus den geringen Abständen der Meßpunkte von der unter 45 ° eingetragenen Geraden gleicher Meßwerte ersichtlich, stimmen die durch Trocknen mittels Luftpyknometer ermittelten Wassergehalte sehr gut überein. Im allgemeinen war der Unterschied kleiner als 0,2 Gew.-%, in einem Fall rd. 0,5 Gew.-%. Die an Main-Kiessand gefundenen Werte stimmten ebenfalls gut überein, wenn auch der Unterschied insgesamt etwas größer war und in drei Fällen 0,5 Gew.-% erreichte oder überschritt.

Im Zementforschungsinstitut wurde die Eigenfeuchte von Rhein-Kiessand in den Korngruppen 0/3, 3/7 und 7/15 mm vergleichsweise mit dem Luftpyknometer und durch Trocknen bei 105 °C bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tafel 3 zusammengestellt. Ein Teil der zunächst wassergesättigten Proben wurde oberflächengetrocknet, bei Proben > 3 mm durch Abtupfen mit Fließpapier, beim Sand 0/3 mm so lange durch einen warmen Luftstrom, bis ein geformter Kegel nicht mehr standfest war (siehe Abschnitt 3.1).

Die Übereinstimmung zwischen der Bestimmung des Gesamtwassergehalts durch Trocknen und mittels Luftpyknometer war wiederum sehr gut; die Unterschiede waren im allgemeinen kleiner als 0,2 Gew.-%, in einem Fall etwas über 0,3 Gew.-%. Die nach Gleichung (2) errechnete Oberflächenfeuchte (Tafel 3, Spalte 5) stimmte mit der Differenz zwischen Gesamtwassergehalt und Kernfeuchte überein.

Mit dem Luftpyknometer kann man also ausreichend zuverlässig, verhältnismäßig einfach und schnell die Oberflächenfeuchte einer Zuschlagstoffprobe bestimmen, wenn die Rohdichte des kernfeuchten Zuschlags bekannt ist. Neben dem Luftpyknometer muß jedoch auch noch eine Waage mit einer Tragkraft von 5 kg und einer Anzeigegenauigkeit von wenigstens 1 g vorhanden sein.

3.3 Bestimmung der Eigenfeuchte mittels CM-Gerät

Beim CM-Gerät (Bild 6) werden Mengen zwischen 5 und 20 g des feuchten Zuschlags in eine Stahldruckflasche gegeben, ferner 2 oder mehr Stahlkugeln und eine Ampulle mit Calciumcarbid. Dann verschließt man den Druckbehälter mit einem gasdichten, druckfesten Verschuß, zerkleinert durch kreisende Bewegung die Ampulle und vermischt auf gleiche Weise das Carbid mit der feuchten Probe. Den sich dabei einstellenden Gasdruck (Acetylgas) liest man an einem Manometer ab und entnimmt

Tafel 3 Feuchtigkeitsbestimmungen an Rheinsand und -kies

Korngruppe	Vorbehandlung	Bestimmung mit Luftpyknometer*)			Trocknen bei 105 °C**) (Gesamtwassergehalt)	CM-Gerät**) (Gesamtwassergehalt)
		Dichte (Zuschlag plus Wasser)	Gesamtwassergehalt	Oberflächenfeuchte		
		g/cm ³	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%
1	2	3	4	5	6	7
0/3 mm	getrocknet (105 °C) oberflächentrocken mäßig feucht sehr feucht	2,665	—	—	—	—
		2,630	0,8	—	0,90	0,7
		2,570	2,3	1,5	2,22	2,1
		2,427	6,2	5,4	6,06	6,1
3/7 mm	getrocknet (105 °C) oberflächentrocken feucht	2,665	—	—	—	—
		2,585	1,9	—	1,93	—
		2,549	2,8	0,9	3,13	—
7/15 mm	getrocknet (105 °C) oberflächentrocken feucht	2,665	—	—	—	—
		2,593	1,7	—	1,74	—
		2,575	2,1	0,4	2,06	—

*) Mittel aus 3 Bestimmungen

**) Mittel aus 2 Bestimmungen



Bild 6 CM-Gerät; Stahldruckflasche (offen), Verschuß mit Manometer, Carbidampullen, Stahlkugeln und Waage (am Transportkasten befestigt)

einer Eichtafel die je nach Einwaage zugehörige Eigenfeuchte. Eine Prüfung dauert etwa 5 min.

Für Sand bis 3 mm Größtkorn kann eine sorgfältig entnommene Probe von nur 10 oder 20 g repräsentativ sein, für Zuschlag über 3 mm trifft das nur bedingt oder nicht zu, weil ein Korn von 7 mm Durchmesser bereits rd. 0,5 g und ein solches von 20 mm rd. 11 g wiegt, so daß man bei einer Probe von 20 g rd. 40 Körner mit 7 mm bzw. nur 2 Körner mit 20 mm Durchmesser einwiegen kann. Das Merkblatt für bodenphysikalische Prüfverfahren im Straßenbau [6] begrenzt daher bei einer Einwaage von 20 g das Größtkorn auf 5 mm.

Der durch die chemische Reaktion entstehende Gasdruck hängt u. a. von dem zur Verfügung stehenden Volumen ab (bei gleicher Temperatur ist $p \cdot V = \text{konstant}$). Das Volumen des gesamten Druckgefäßes umfaßt etwa 670 cm³; hiervon sind die Volumen der Stahlkugeln, des Carbid und der zertrümmerten Ampulle abzuziehen. Eine Zuschlagprobe von 5 g nimmt rd. 1,9 cm³, eine solche von 20 g rd. 7,5 cm³ Volumen ein. Diese Unterschiede sind in der dem Gerät mitgelieferten Eichtafel berücksichtigt. Aus diesem Grunde sind stets nur eine Ampulle und die dem Gerät beigelegten Stahlkugeln zu verwenden. Fügt man eine weitere große Stahlkugel hinzu, dann erhält man z. B. einen Druck von 1,00 kp/cm² statt 0,95 kp/cm², d. h. eine um 0,3 Gew.-% zu große Eigenfeuchte.

Der entstehende Druck hängt auch von der Temperatur ab. So ergab eine Prüfung bei 20 °C (Wasserbad) einen Druck von 1,15 kp/cm²; durch Senken der Temperatur auf 10 °C sank der Druck auf 1,04 kp/cm². Ein Erwärmen auf 37 °C bewirkte einen Druckanstieg auf 1,26 kp/cm². Während die wahre Eigenfeuchte

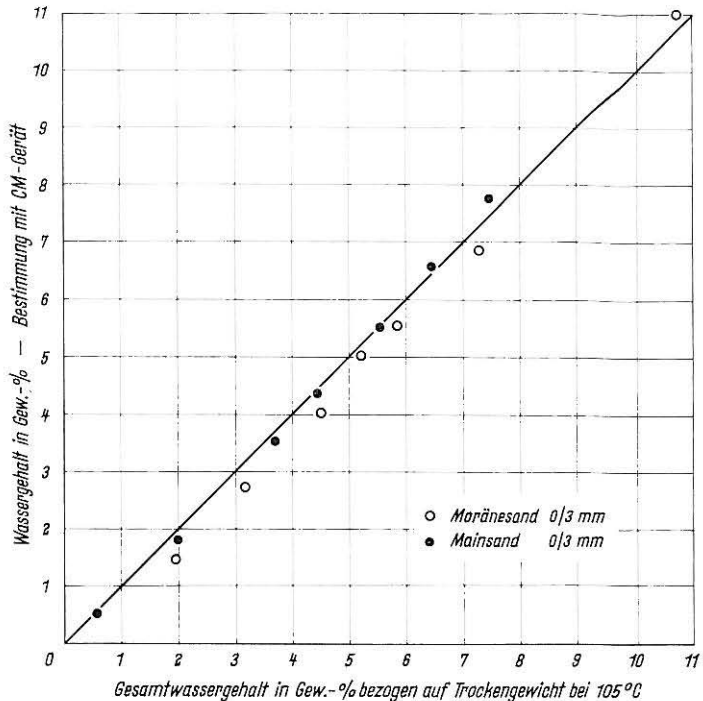


Bild 7 Bestimmung des Wassergehalts mit dem CM-Gerät im Vergleich zum Gesamtwassergehalt durch Trocknen [5]

bei 6,1 Gew.-% lag, wurde durch die niedrigere Temperatur eine Feuchte von 5,5 Gew.-% und durch die höhere Temperatur eine solche von 6,7 Gew.-% vorgetauscht. Auf den Einfluß der Temperatur ist daher bei Schnellprüfungen auf der Baustelle zu achten.

Mit dem CM-Gerät erfaßt man beim Sand 0/3 mm die Oberflächenfeuchte und den größten Teil der Kernfeuchte. Das geht aus Bild 7 und Tafel 3 hervor, in denen die mit CM-Gerät und durch Trocknen bei 105 °C festgestellten Wassergehalte gegenübergestellt sind. Beim Rhein- und Mainsand war der mit dem CM-Gerät ermittelte Wassergehalt nur um 0,1 bis 0,2 Gew.-% kleiner als der durch Trocknen bestimmte Gesamtwassergehalt, beim Moränesand war er im Durchschnitt um 0,4 Gew.-% kleiner, vermutlich weil die Poren dieses Sandes feiner sind. Bei oberflächentrockenem, jedoch kernfeuchtem Rheinsand 0/3 mm erfaßte das CM-Gerät die Kernfeuchte bis auf einen Rest von rd. 0,2 Gew.-% (siehe Tafel 3).

Bei größerem Zuschlag und einer Einwaage von 20 g werden die Streuungen größer, weil die Proben nicht mehr repräsentativ sind. Der Anteil der nicht erfaßten Kernfeuchte nimmt zudem zu. Im Otto-Graf-Institut fand man für Moräne- und Mainsand 3/7 mm eine nicht erfaßte Restkernfeuchte von rd.

0,8 Gew.-%, für Moräne-Kies 7/15 mm ebenfalls 0,8 Gew.-% und für Main-Kies 7/15 mm rd. 1,4 Gew.-%. Wie unter Abschnitt 3.1 beschrieben, betrug die Kernfeuchte des Moräne-Kieses im Mittel 0,8 Gew.-%, die des Main-Kieses 2,8 Gew.-%. Wahrscheinlich infolge der sehr unterschiedlichen Porosität reagierte beim Moräne-Kies praktisch nur die Oberflächenfeuchte, beim Main-Kies jedoch auch der größte Teil der Kernfeuchte mit dem Carbid.

Mit dem CM-Gerät kann man einfach, schnell und ausreichend zuverlässig den Feuchtigkeitsgehalt von Sand 0/3 mm prüfen. Die Messung liefert die Oberflächenfeuchte plus einen größeren Anteil der Kernfeuchte. Sofern keine genaueren Messungen vorliegen, zieht man daher vom Prüfergebn einen Betrag von rd. 0,5 Gew.-% ab, um die für die betontechnischen Eigenschaften maßgebende Oberflächenfeuchte zu erhalten. Für Grobsand 3/7 mm bestimmt man zweckmäßig durch Parallelversuche mittels Trocknen den Anteil der Kernfeuchte, die bei der Messung mit erfaßt und vom Prüfergebn abzuziehen ist. Zur Bestimmung der Eigenfeuchte von Kies > 7 mm, die jedoch nur in relativ engen Grenzen schwankt und daher von geringem Einfluß ist, eignet sich das CM-Gerät weniger.

3.4 Bestimmung der Eigenfeuchte mittels elektrischer Widerstandsmessungen [5]

Für diese Untersuchungen wurde am Otto-Graf-Institut ein Meßgerät gebaut (Bild 8), das aus einem quadratischen Behälter aus hochisolierenden Kunststoffplatten von 47,5 cm Seitenlänge und 31,2 cm Höhe bestand. Auf dem Boden waren im Abstand von 20 cm zwei Messingelektroden von 1,5 cm Durchmesser und 0,2 cm

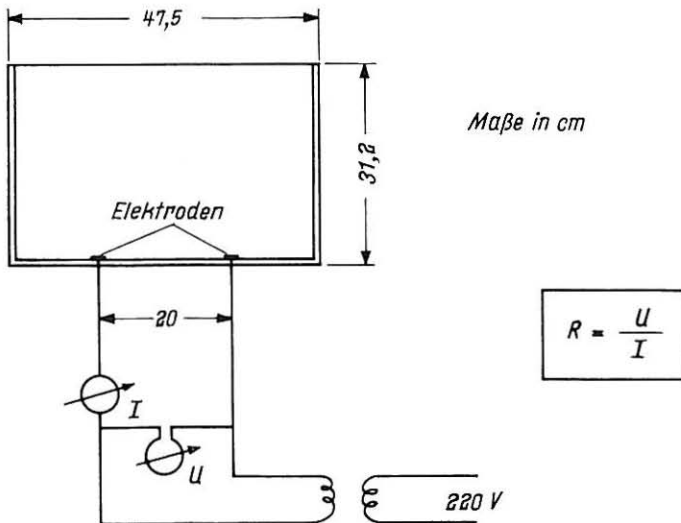


Bild 8 Versuchsanordnung zum Messen des elektrischen Widerstands von feuchten Zuschlagproben [5]

Höhe angeordnet³⁾. Der Strom wurde über einen Sicherheits-transformator dem Netz entnommen. Gemessen wurden die angelegte Spannung in V und die Stromstärke in mA. Der elektrische Widerstand ergab sich aus dem Quotienten von Spannung und Stromstärke.

Zum Eichen wurde der Behälter zu 1/3, 2/3 und 3/3 mit trockenen und feuchten Zuschlagstoff-Korngruppen gefüllt, und zwar sowohl lose als auch durch mehrmaliges Aufstoßen verdichtet; dann wurde der Widerstand gemessen und die Eigenfeuchte durch Trocknen bei 105 °C bestimmt. In Bild 9 ist der elektrische Widerstand des Moräne- und des Mainsandes 0/3 mm bei loser oder verdichteter Schüttung (Behälter zu 1/3 gefüllt)

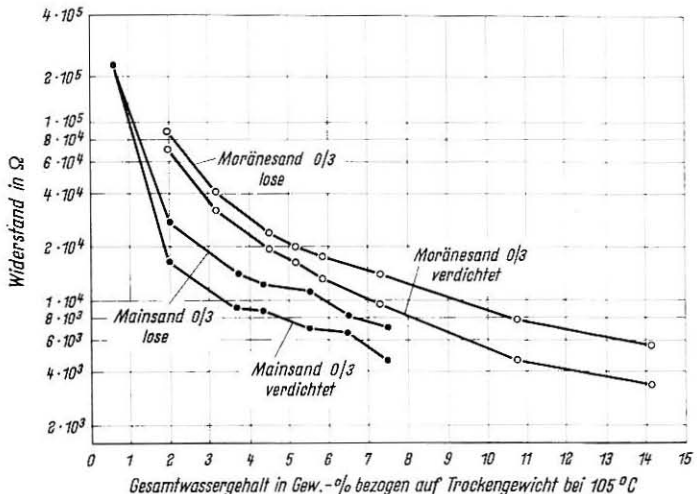


Bild 9 Elektrischer Widerstand von lose eingefülltem oder verdichtetem Main- und Moränesand in Abhängigkeit vom Gesamtwassergehalt [5]

über dem durch Trocknen bei 105 °C bestimmten Gesamtwassergehalt aufgetragen. Der elektrische Widerstand fand sich bei gleichem Gesamtwassergehalt je nach Lagerungsdichte und nach Herkunft des Zuschlags sehr verschieden, oder — anders ausgedrückt — gleicher elektrischer Widerstand entstand je nach Lagerungsdichte und Herkunft mit recht unterschiedlichem Gesamtwassergehalt (siehe das Beispiel in Tafel 4, obere Hälfte).

Wenn der Behälter des Meßgeräts zu 2/3 oder 3/3 gefüllt war, dann ergaben sich in allen Fällen bei gleicher Eigenfeuchte deutlich niedrigere Widerstände; allerdings waren die Unterschiede bei verdichteter Füllung von 2/3 oder 3/3 der Kastenhöhe nicht mehr groß.

³⁾ Die Versuchsergebnisse wurden möglicherweise durch diese Anordnung der Elektroden beeinflusst, da die Lagerung an der Grenzfläche Schüttung — Boden nicht den durchschnittlichen Verhältnissen der Schüttung entspricht.

Tafel 4 Unterschiedliche Eigenfeuchte bei gleichem elektrischen Widerstand

Elektr. Widerstand	Zuschlag	1/3 Füllung	Gesamt-wassergehalt
Ω			Gew.-%
$2 \cdot 10^4$	Moräne 0/3	lose	5,2
$2 \cdot 10^4$	Moräne 0/3	verdichtet	4,4
$2 \cdot 10^4$	Main 0/3	lose	2,8
$2 \cdot 10^4$	Main 0/3	verdichtet	1,9
$6 \cdot 10^4$	Moräne 3/7	verdichtet	3,5
$6 \cdot 10^4$	Moräne 7/15	verdichtet	2,7
$6 \cdot 10^4$	Main 3/7	verdichtet	2,7
$6 \cdot 10^4$	Main 7/15	verdichtet	3,7

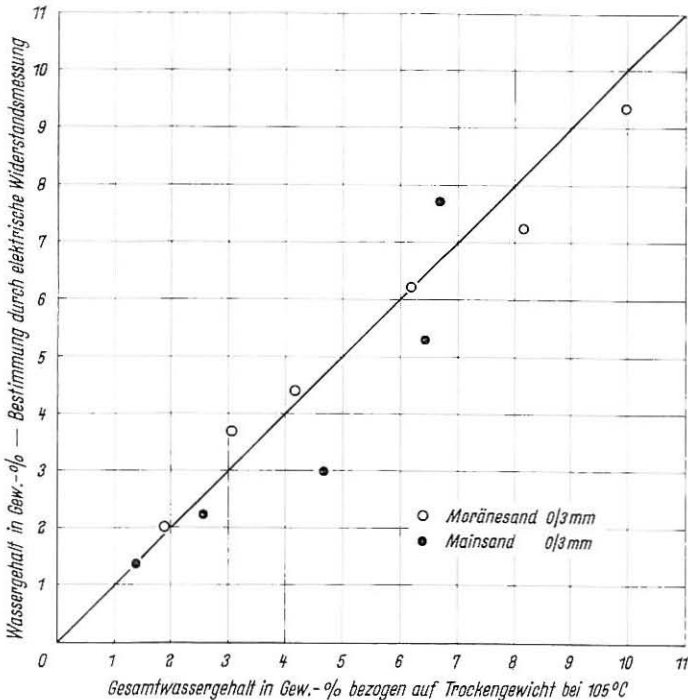


Bild 10 Bestimmung des Wassergehalts durch elektrische Widerstandsmessung im Vergleich zum Gesamtwassergehalt durch Trocknen [5]

Bei Korngruppen über 3 mm war der Einfluß der Schüttdichte kleiner als bei Sand 0/3 mm, der Einfluß der Herkunft und der Korngröße war jedoch ebenfalls groß (siehe das Beispiel in Tafel 4, untere Hälfte). Die Unterschiede im elektrischen Widerstand von Zuschlagstoffen gleicher Korngruppe und gleicher Eigenfeuchte, jedoch verschiedener Herkunft werden auf Unterschiede in der Kornzusammensetzung und der dadurch bedingten unterschiedlichen Schüttdichte, auf die unterschiedliche Porosität des Gesteins, auf die unterschiedliche Leitfähigkeit verschiedener Minerale und auf möglicherweise gelöste Stoffe zurückgeführt. Von größerem Einfluß kann unter Betriebsbedingungen auch die Temperatur sein, sofern keine besondere temperaturkompensierte Schaltung angeordnet ist.

In Bild 10 sind die mittels elektrischer Widerstandsmessung und durch Trocknen bestimmten Gesamtwassergehalte von Moränensand und Mainsand 0/3 mm aufgetragen. Die Meßpunkte weichen von der unter 45° eingetragenen Geraden gleicher Werte mehr ab als bei den zuvor beschriebenen Verfahren. Die Unterschiede betragen im Mittel beim Moränensand 0,4 Gew.-% und beim Mainsand 0,8 Gew.-% mit Einzelabweichungen bis zu 1,7 Gew.-%.

4. Erfassen der Oberflächenfeuchte des Zuschlags durch Frischbetonuntersuchungen

Man kann die Oberflächenfeuchte des Zuschlags auch dadurch erfassen und zugleich berücksichtigen, daß man während des Mischens und der Anmachwasserzugabe bestimmte Frischbetoneigenschaften untersucht und den Wasserzusatz darauf abstimmt. Die Konsistenz und der elektrische Widerstand des Frischbetons werden für solche Aufgaben herangezogen.

4.1 Erfassen der Oberflächenfeuchte durch Konsistenzmessung

Voraussetzung für das Erfassen und Berücksichtigen des Anmachwasserzusatzes durch Konsistenzmessung am Frischbeton sind eine gleichbleibende Kornzusammensetzung des Zuschlags, vor allem im Feinstsandbereich, und das Einhalten des Mischungsverhältnisses, d. h. ein hinreichend genaues Abmessen von Zement und Zuschlag. Die Konsistenz wird meistens im oder am Mischer gemessen und setzt dann auch noch einen gleichbleibenden Füllungsgrad des Mixers voraus.

Zu den einfachsten Verfahren gehört das Messen der Leistungsaufnahme des elektrischen Antriebsmotors [4] oder der Beanspruchung der Antriebswelle. Wichtig ist hierbei, daß der Mischer regelmäßig geschmiert und gereinigt wird, damit die Leistungsaufnahme nicht durch Reibung in den Lagern oder ähnliches erhöht wird. Nach amerikanischen Feststellungen reicht die Empfindlichkeit dieser Messungen allerdings nicht aus, um Konsistenzänderungen von steifem, magerem Beton zuverlässig zu erfassen [7].

Bei anderen Konsistenzprüfverfahren drückt der bewegte Beton gegen einen gelenkig eingebauten Arm, oder es wirkt das in einer Auffangvorrichtung sich je nach Konsistenz mehr oder

weniger groß einstellende Betongewicht auf einen Hebel [3]. Im Bureau of Reclamation ist eine Konsistenzprüfeinrichtung für große Kipptrommelmischer entwickelt und erprobt worden [7], bei der das Kippmoment gemessen wird, das der Beton durch das je nach Konsistenz verschieden hohe Auftürmen im hinteren Teil der Trommel bewirkt.

4.2 Erfassen des Gesamtwassergehalts durch elektrische Widerstandsmessung des Frischbetons

Nach dem gleichen Prinzip, nach dem man den Gesamtwassergehalt des Zuschlags mißt, kann man auch den gesamten Wassergehalt des Betons bestimmen. Hierzu sind von der Industrie verschiedene Geräte entwickelt worden [8], die man in die meisten Mischer nachträglich einbauen kann und die in einigen Fällen die Wasserzufuhr anhand der Messungen automatisch regeln. Ähnlich wie bei feuchten Zuschlagstoffen beeinflussen Dichte, Mischungsverhältnis, Kornzusammensetzung, Zementart, Zusatzmittel, Temperatur und andere Einflüsse den elektrischen Widerstand des im Mischer bewegten Frischbetons. Die Meßgeräte sind daher im allgemeinen nicht auf einen absoluten Wassergehalt oder Wasserzementwert geeicht, sondern sie werden mit dem Soll-Beton im Mischer eingestellt und gelten dann nur für diese Mischung; Schaltungen für mehrere Standardmischungen sind möglich.

5. Eignung der Meßverfahren für die Praxis

Alle Verfahren zur Bestimmung der Eigenfeuchte des Zuschlags bei der Aufbereitung des Betons haben das Ziel, die Oberflächenfeuchte des Zuschlags bei der Zugabe des Anmachwassers zu berücksichtigen, um Beton mit gleichbleibender Konsistenz und Festigkeit herzustellen. Die direkten Verfahren messen die Eigenfeuchte des Zuschlags und gestatten damit eine Korrektur bei der Zugabe des Anmachwassers, die indirekten Verfahren ermöglichen eine Korrektur bei der Wasserzugabe durch das Messen bestimmter Frischbetoneigenschaften. Welches Verfahren besonders zweckmäßig ist, richtet sich u. a. auch danach, ob es für eine nur für kurze Zeit eingerichtete Baustelle oder für ein stationäres Betonwerk bzw. eine Großbaustelle gedacht ist.

Sehr große Schwankungen in der Eigenfeuchte sind nur beim Sand, nicht jedoch bei gröberen Zuschlagstoffen zu erwarten; das liegt daran, daß infolge der großen Oberfläche und der engen Hohlräume zwischen den einzelnen Körnern des Sandes das maximale Wasserhaltevermögen eines Sandes 0/3 mm bis zu 20 Gew.-% ausmachen kann (bei sehr feinstsandreichen Sanden noch mehr), während das Wasserhaltevermögen der Korngruppe 3/7 mm etwa 5 Gew.-%, das der Korngruppe > 7 mm etwa 3 Gew.-% nicht übersteigen kann [5]. Daher kommt vor allem der Berücksichtigung der Oberflächenfeuchte des Sandes besondere Bedeutung zu.

Um kurzfristige größere Schwankungen in der Eigenfeuchte des Zuschlags weitgehend auszugleichen, ist eine Vorlagerung des Zuschlags im Lieferwerk oder auf der Baustelle sehr zweckmäßig. Die Vorläufigen Richtlinien für die Herstellung und Lieferung von

Transportbeton [9] schreiben in Abschnitt 2.3.1 eine entsprechende Lagerung „z. B. durch überdachte oder mit Kunststoffolien oder dergl. geschützte Lagerung der Feinstanteile der Zuschlagstoffe“ vor. Aus dem gleichen Grunde hat man vor kurzem in einem großen Betonfertigteilwerk 19 m hohe Zuschlagstoff-Silos aus Betonfertigteilen errichtet, deren Wände 800 Schlitz- und deren Böden eine Drainage aufwiesen [10]. Diese Silos fassen den wöchentlichen Bedarf von etwa 1200 m³ je Korngruppe und bewirken einen Ausgleich der Eigenfeuchte.

5.1 Trocknen

Durch Trocknen kann man den Gesamtwassergehalt des Zuschlags verhältnismäßig einfach und zuverlässig bestimmen. Das Verfahren eignet sich daher auch recht gut zur Überprüfung anderer Feuchtigkeitsmeßverfahren. Zur direkten Bestimmung der Oberflächenfeuchte eignet sich das Trocknen weniger, weil der Zustand des oberflächentrockenen, jedoch kernfeuchten Zuschlags vor allem bei scharfem Trocknen schwierig zu bestimmen ist und weil die dann noch warmen Zuschläge während des Wägens ständig weiter Wasser abgeben.

Zweckmäßig sollte man daher immer den Gesamtwassergehalt durch das einfachere vollständige Trocknen bestimmen und hiervon die für einen Zuschlag praktisch konstante Kernfeuchte abziehen. Die Kiessandlieferanten sollten dazu zuverlässige Angaben über die Kernfeuchte ihres Zuschlags machen.

Nachteilig ist der Zeitaufwand für das Trocknen. Es ist daher weniger geeignet, wenn man auf einer Baustelle die während des Betonierens laufend mit größerem Unterschied im Wassergehalt angefahrenen Sandlieferungen schnell prüfen will.

5.2 Luftpyknometer

Sofern die Rohdichte des oberflächentrockenen, jedoch kernfeuchten Zuschlags bekannt ist, kann man mit dem Luftpyknometer die Oberflächenfeuchte des Zuschlags direkt bestimmen. Das Verfahren liefert hinreichend zuverlässige Meßergebnisse; das setzt jedoch ein sorgfältiges Wägen und Bestimmen des Druckausgleichs voraus, da das Ergebnis aus einer kleinen Differenz relativ großer Zahlen errechnet wird. Die Prüfung nimmt 10 bis 15 min Zeit in Anspruch und eignet sich daher zur Überwachung der Oberflächenfeuchte von Zuschlagstofflieferungen während des Betonierens.

5.3 CM-Gerät

Mit dem CM-Gerät kann man die Eigenfeuchte des Sandes 0/3 mm schnell und hinreichend zuverlässig bestimmen. Bei einiger Übung dauert die Prüfung weniger als 5 min; sie eignet sich daher recht gut zur häufigeren Überprüfung des Sandes auf Schwankungen in der Eigenfeuchte während des Betonierens. Bei der Auswertung der Messungen ist zu beachten, daß das CM-Gerät die Oberflächenfeuchte und den größten Teil der Kernfeuchte des Sandes erfaßt; der konstante Anteil der miterfaßten Kernfeuchte

(etwa 0,5 Gew.-%) ist daher vom Meßergebnis abzuziehen. Zu beachten sind ferner der Einfluß der Außentemperatur (Gerät im Sommer nicht in die Sonne und im Winter nicht ins Freie stellen) und der Einfluß der Einwaage (die mitgelieferte, sehr einfache Waage sollte daher durch ein 20 g-Gewichtstück, das man zweckmäßig der Ausrüstung des CM-Gerätes zufügt, vor der Wägung überprüft bzw. justiert werden). Die Oberflächenfeuchte der Korngruppe 3/7 mm kann man mit dem CM-Gerät ebenfalls überwachen, wenn man zuvor durch paralleles Trocknen den Anteil der durch das CM-Gerät miterfaßten Kernfeuchte bestimmt. Die Eigenfeuchte von Kies > 7 mm läßt sich durch das CM-Gerät nicht zuverlässig erfassen, weil die eingewogene Probe nicht repräsentativ sein kann.

5.4 Elektrische Widerstandsmessung

In stationären Betonaufbereitungsanlagen, wie z. B. auf Großbaustellen, in Beton- oder in Transportbetonwerken, ist ein kontinuierliches Messen der Zuschlagstoffeigenfeuchte, besonders der des Sandes, angezeigt. Hierzu hat man im Auslaufbereich von Sandsilos, in den Wiegesilos oder an anderer geeigneter Stelle elektrische Widerstandsmeßgeräte eingebaut. Nach Berichten aus der Praxis [11, 12] zeigen solche Geräte größere Schwankungen im Wassergehalt des Sandes eindeutig an, z. B. Anstieg der Eigenfeuchte von 7 auf 13 Gew.-% [11]. Auch nach sorgfältiger Eichung kann man jedoch nur mit einer Genauigkeit von ± 1 Gew.-% rechnen. Die Abweichungen des Wassergehalts vom Anzeigewert können bei wechselnden Sandlieferungen (unterschiedliche Zusammensetzung, verschiedene Herkunft) oder bei unterschiedlicher Schüttdichte, z. B. infolge veränderter Silofüllung, noch größer sein. Bei einem Sandanteil von wenigstens 500 kg je m³ Beton sind selbst unter günstigen Bedingungen Unterschiede im Anmachwasser von rd. 10 l/m³ zu erwarten, was bei steifem Beton bereits merkliche Veränderungen in der Konsistenz und Festigkeit zur Folge hat. Ist der Sandanteil wesentlich höher, wie z. B. bei Betondachsteinen, dann ist eine zuverlässige Dosierung auf diese Weise kaum möglich.

Für die elektrische Widerstandsmessung des Frischbetons trifft im wesentlichen das gleiche wie für die des Zuschlags zu. Das Messen bereitet dort auch Schwierigkeiten, weil die Elektroden zum Teil mit Zementleim verkrusten und weil sich dadurch Änderungen im elektrischen Widerstand ergeben. Messungen geben bei ständig gleicher Mischung jedoch einen guten Anhalt, ob sich die Mischung grundlegend geändert hat.

5.5 Konsistenzmessung

Voraussetzung für eine Dosierung des Anmachwasserzusatzes aufgrund einer Konsistenzmessung am oder im Mischer sind gleiche Kornzusammensetzung, gleiches Mischungsverhältnis und gleiche Betonmenge. In stationären Aufbereitungsanlagen bietet sich hierfür eine Konsistenzprüfung durch die Beanspruchung (Verdrehung) der Antriebswelle oder die Leistungsaufnahme des elektrischen Antriebs an. In den schwedischen Richtlinien für

Transportbeton ist diese Messung oder eine andere gleichwertige Konsistenzprüfung vorgeschrieben [13]. Bei weichen und plastischen Mischungen liegt der Genauigkeitsgrad dieses Verfahrens in der gleichen Größenordnung wie der der elektrischen Widerstandsmessung. Bei steifen Mischungen spricht dieses Verfahren weniger zuverlässig an [7].

Bei Mischern, die eine gute Beobachtung der Füllung während des Mischvorganges erlauben, reicht hingegen eine Beurteilung der Konsistenz nach Augenschein durch einen zuverlässigen und eingearbeiteten Maschinisten aus, um den Wasserzusatz auf die verlangte Konsistenz ausreichend genau abzustimmen. Besonders bei erdfeuchten Mischungen in Betonsteinwerken, deren nachfolgendes Verarbeiten eine sehr gleichbleibende Konsistenz erfordert, ist auch heute noch nach automatischer Vorgabe eines bestimmten Wasserzusatzes eine Überwachung bzw. Feinsteuerung von Hand nötig.

5.6 Kombination mehrerer Meßverfahren

Gestattet die Verarbeitung des Betons einen bestimmten Konsistenzbereich, wie er z. B. für die Lieferung von Transportbeton zugestanden wird [9], dann reichen die derzeitigen Meßverfahren ohne Blick in den Mischer bei der Zugabe des Anmachwassers aus, um die Schwankungen in der Eigenfeuchte des Zuschlags vom Bedienungsstand aus zu berücksichtigen. Dies ist vor allem dann möglich, wenn die Steuerung durch eine Kombination von untereinander unabhängigen Meßverfahren erfolgt. So wird in einem Transportbetonwerk zunächst die Eigenfeuchte des Sandes 0/3 mm durch eine elektrische Widerstandsmessung ermittelt und danach der Anmachwasserzusatz abgeschätzt. Die Konsistenz des Betons wird dann anhand der Leistungsaufnahme des elektrischen Antriebs beobachtet, um gegebenenfalls noch eine Korrektur vorzunehmen. Mit der Einschränkung, daß stets Sand gleicher Herkunft und Zusammensetzung verwendet wird, hat sich dieses Verfahren bewährt.

6. Zusammenfassung

6.1 Die Eigenfeuchte der Zuschlagstoffe setzt sich aus der Oberflächenfeuchte und der Kernfeuchte zusammen. Die Oberflächenfeuchte muß man auf das Anmachwasser des Betons anrechnen. Sollen größere Schwankungen in der Konsistenz und der Festigkeit des Betons vermieden werden, dann sind bereits Schwankungen der Eigenfeuchte von mehr als 0,3 Gew.-% bei der Wasserzugabe zu berücksichtigen. Mit größeren Schwankungen in der Eigenfeuchte ist bei Sand bis 3 mm stets zu rechnen, bei größeren Zuschlagstoffen dagegen nur in Einzelfällen.

6.2 Die Eigenfeuchte der Zuschlagstoffe kann man direkt durch Trocknen, mittels Luftpyknometer, mit dem CM-Gerät, mit elektrischer Widerstandsmessung und mit anderen physikalischen oder chemischen Verfahren bestimmen oder indirekt durch Messen der Konsistenz und des elektrischen Widerstands des Frischbetons erfassen.

6.3 Durch Trocknen kann man den Gesamtwassergehalt einfach und zuverlässig bestimmen. Ist die für einen bestimmten Zuschlag praktisch konstante Kernfeuchte vorab gesondert bestimmt worden, dann erhält man die auf das Anmachwasser anzurechnende Oberflächenfeuchte als Differenz zwischen Gesamtwassergehalt und Kernfeuchte.

6.4 Ist die Rohdichte des oberflächentrockenen, jedoch kernfeuchten Zuschlags bekannt, dann kann man mit dem Luftpyknometer direkt die Oberflächenfeuchte des Zuschlags ermitteln. Bei sorgfältiger Prüfung liegt die mittlere Abweichung, bezogen auf die Wassergehaltsbestimmung durch Trocknen, unter 0,3 Gew.-%.

6.5 Das CM-Gerät ermittelt in weniger als 5 min die Eigenfeuchte von Sand 0/3 mm mit der gleichen Genauigkeit. Dabei werden die Oberflächenfeuchte und der größte Teil der Kernfeuchte gemessen, so daß vom Meßergebnis ein konstanter Betrag in der Größenordnung von 0,5 Gew.-% abzuziehen ist, um die auf das Anmachwasser anzurechnende Oberflächenfeuchte zu erhalten. Die Oberflächenfeuchte der Korngruppe 3/7 mm läßt sich mit dem CM-Gerät nach parallel durchgeführten Trockenversuchen ermitteln, die von Kies > 7 mm praktisch nicht.

6.6 Da die elektrische Leitfähigkeit von feuchtem Zuschlag nicht nur von dessen Wassergehalt, sondern auch von der Schüttdichte, der Kornzusammensetzung, der mineralischen Beschaffenheit, gelösten Stoffen u. a. abhängt, muß man bei der Bestimmung des Gesamtwassergehaltes durch elektrische Widerstandsmessungen im allgemeinen mit Abweichungen bis zu 1 Gew.-% rechnen. Gleiches gilt auch für elektrische Widerstandsmessungen am Frischbeton. Man erhält jedoch einen sicheren Anhalt für größere Änderungen in der Betonzusammensetzung.

6.7 Konsistenzmessungen, z. B. durch die Leistungsaufnahme des elektrischen Antriebs, liefern ebenfalls einen Anhalt für größere Änderungen in der Betonzusammensetzung. Dieses Verfahren spricht auf plastische und weiche Betone besser an als auf steife Mischungen.

6.8 Die Beurteilung der Konsistenz nach Augenschein durch einen erfahrenen Maschinisten reicht bei steiferen Mischungen aus, um bei gleichbleibender Kornzusammensetzung den Wasserzusatz zu bemessen (Einhalten des Gesamtwassergehalts). Läßt das Verarbeiten des Betons einen gewissen Konsistenzbereich zu, dann ist eine automatische Wasserdosierung möglich; kleinere Schwankungen sind bei halbautomatischen Anlagen zu erwarten, wenn die Eigenfeuchte und die Konsistenz getrennt gemessen, auf dem Bedienungsstand überwacht und gegebenenfalls von Hand korrigiert werden.

SCHRIFTTUM :

- [1] Walz, K.: Einfluß des Wassergehalts der Zuschlagsstoffe auf Festigkeit und Konsistenz des Betons. Der Bautenschutz 3 (1932) H. 2, S. 17/20.
- [2] Walz, K.: Prüfung des Zuschlags; Wassergehalt und Wasseraufnahme. Handbuch der Werkstoffprüfung, Bd. 3: Die Prüfung nichtmetallischer Baustoffe. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 398/399.
- [3] Walz, K.: Die Prüfung des Frischbetons, Verarbeitungseigenschaften. Handbuch der Werkstoffprüfung, Bd. 3: Die Prüfung nichtmetallischer Baustoffe. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 405.
- [4] Walz, K.: Verarbeitbarkeit und mechanische Eigenschaften des Frischbetons. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 91. W. Ernst & Sohn, Berlin 1938, S. 12.
- [5] Amtliche Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, Otto-Graf-Institut, an der TH Stuttgart, Abt. Erd- und Grundbau: Vergleichende Feuchtigkeitsmessungen mit verschiedenen Meßmethoden. Prüfungsbericht Nr. G 2750, Stuttgart 1965 (unveröffentlicht).
- [6] Merkblatt für bodenphysikalische Prüfverfahren im Straßenbau. 3. Ausgabe. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1963.
- [7] US-Depart. of the Inter., Bureau of Reclamation: Concrete Manual. 7. Aufl. Denver 1963, S. 271/273.
- [8] Müller, H.: Wasserdosierung mit Geräten. Betonstein-Zeitung 29 (1963) H. 8, S. 419/430.
- [9] Vorläufige Richtlinien für die Herstellung und Lieferung von Transportbeton (Fassung April 1961). Zement-Taschenbuch 1964/65. Bauverlag, Wiesbaden 1963, S. 370/381.
- [10] Turm mit 800 Schlitzen, Zuschlagstoff-Silos aus Betonfertigteilen für ein Fertigteilwerk. beton 16 (1966) H. 4, S. 160/161.
- [11] Graf, P.: Elektrische Bestimmung der Sandfeuchtigkeit im Beton-turm der Staumauer Mauvoisin. Schweiz. Bauzeitung 75 (1957) H. 6, S. 85/86.
- [12] Alstine, C. B. van: Mixing water control by use of a moisture meter. Proc. Amer. Concr. Inst. 52 (1955/56) S. 341/359.
- [13] Wischers, G.: Schwedische Richtlinien für Transportbeton. Belontechnische Berichte 1964. Beton-Verlag, Düsseldorf 1965, S. 219/231.