

Über Aufgaben und Stand der Betontechnologie

Von Kurt Walz und Gerd Wischers, Düsseldorf

Übersicht

Die Beherrschung, Verbesserung und Entwicklung einzelner Betoneigenschaften sowie die Rationalisierung und damit ein Senken der Herstellkosten sind wesentliche Aufgaben der Betontechnologie. In den letzten drei Jahrzehnten haben sowohl ein großes Bauvolumen als auch neuartige Bauaufgaben zu großen Fortschritten in der Betontechnik und zu der verbreiteten Anwendung des Betonbaus geführt. Voraussetzung dafür waren u. a. eine systematische Forschung auf betontechnologischem Gebiet und die zügige Einführung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis.

1. Einleitung

Unter Technologie versteht man die Lehre und systematische Darstellung der Vorgänge und Verfahren, mit denen Erzeugnisse aus natürlichen, aufbereiteten oder künstlichen Ausgangsstoffen hergestellt werden. Entsprechend behandelt die Betontechnologie die Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften aus Zement, Zuschlag und Wasser sowie gegebenenfalls Zusatzmitteln und Zusatzstoffen. Die Betontechnologie schließt sowohl den Aufbau des Betons und verfahrenstechnische Vorgänge ein als auch die von den Bauaufgaben geforderten Eigenschaften des frischen und erhärteten Betons.

Eine umfassende Darstellung der Betontechnologie ist wegen der thematischen Vielfalt des Stoffes und der vielschichtigen Verknüpfungen mit anderen Fachgebieten in dem hier abgesteckten Rahmen nicht möglich. Mit dem Beitrag können die Verfasser daher lediglich versuchen, einen Überblick über die Aufgaben und den derzeitigen Stand der Betontechnologie zu geben. Dabei waren eine Beschränkung und damit eine Auswahl unerlässlich, so daß der Fachmann möglicherweise den einen oder anderen Gesichtspunkt vermißt. Auf die Wiedergabe der besonders in den beiden letzten Jahrzehnten außerordentlich angewachsenen Zahl von Veröffentlichungen und Patenten mußte ebenso verzichtet werden wie auf die Wiedergabe aufschlußreicher Versuchsdurchführungen und Ergebnisse. Bevorzugt wurde von der Forschung und Entwicklung in unserem Land ausgegangen, obschon diese sehr stark in die

internationale Entwicklung eingebunden ist. Da gleichzeitig in dieser Zeitschrift über Sicherheit, Ausführungs- und Maschinenteknik sowie Transportbeton berichtet wird, wurde in diesem Beitrag deren Bedeutung in der Betontechnologie weniger berücksichtigt als sonst von den Zusammenhängen her angemessen gewesen wäre.

Der Überblick wurde gegliedert in Aufbau und Herstellung des Betons, Gefüge und Festigkeit des erhärteten Betons sowie Formänderungen, Dichtigkeit und Beständigkeit des erhärteten Betons. Dabei waren gewisse Überschneidungen unvermeidbar.

Aufbau und Herstellung des Betons

2. Aufbau

Für die eindeutige Festlegung der Zusammensetzung des Betons hat sich die Angabe der in 1 m^3 des frischen, verdichteten Betons enthaltenen Bestandteile (Zement, Zuschlag, Wasser sowie gegebenenfalls Zusatzmittel und Zusatzstoffe in kg je m^3) gegenüber dem früher üblichen, auf den Zement bezogenen Mischungsverhältnis durchgesetzt.

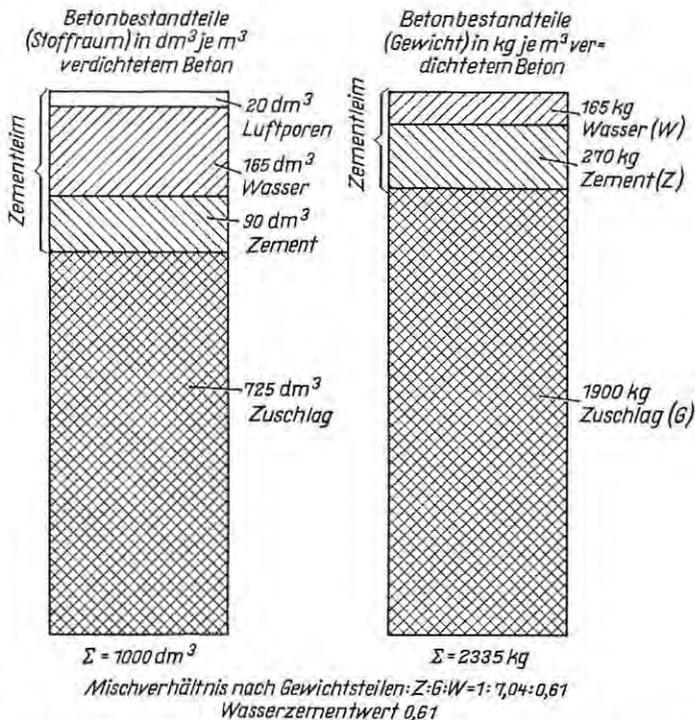


Bild 1 Zusammensetzung von 1 m^3 verdichtetem Frischbeton nach Stoffraum- und Gewichtsmengen

Für die Berechnung der Zusammensetzung von Normalbeton wird meist die sogenannte Stoffraumrechnung oder Stoffraumgleichung bevorzugt. Sie gibt an, welche Volumenanteile der verschiedenen Betonbestandteile in 1 m³ des frischen, verdichteten Betons vorhanden sind. Die Stoffraumgleichung lautet

$$\frac{Z}{\rho_Z} + \frac{G}{\rho_G} + \frac{W}{\rho_W} + P = 1000 \text{ dm}^3/\text{m}^3$$

Dabei sind Z, G und W die Anteile von Zement, Zuschlag ggf. einschließlich Zusatzstoff und Wasser in kg/m³, ρ die zugehörigen Rein- bzw. Rohdichten und P der Luftgehalt in dm³/m³.

In der Regel wird Beton mit einer bestimmten Druckfestigkeit und Konsistenz vorgeschrieben, z. T. auch Beton mit einem bestimmten Wasserzementwert oder Zementgehalt. Der z. B. für eine bestimmte Druckfestigkeit erforderliche Wasserzementwert $w = W/Z$ ergibt sich aus einer empirisch ermittelten Beziehung zwischen dem

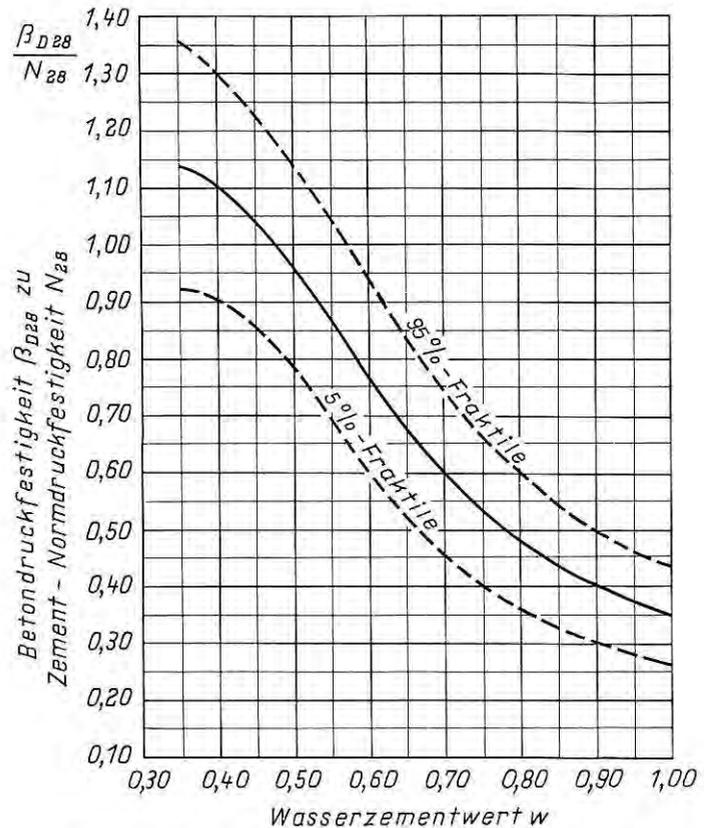


Bild 2 Beziehung zwischen Wasserzementwert w , Normdruckfestigkeit des Zements N_{28} (DIN 1164) und Würfeldruckfestigkeit β_{D28} des Betons. Empirisch ermittelte Beziehung für 20-cm-Würfel nach DIN 1048.

Festigkeitsbeitrag des Zements (Normdruckfestigkeit) und dem Wasserzementwert. Der Beziehung liegt allerdings die Voraussetzung zugrunde, daß Festigkeit und Elastizitätsmodul des Zuschlags größer sind als die des Zementsteins, was bei Normalbeton aus dichtem, festem Gestein immer gegeben ist.

Der Wassergehalt für eine bestimmte Konsistenz des Betons wird in erster Linie von der Kornzusammensetzung des Zuschlags bestimmt. Von verschiedenen Forschern wurden, ebenfalls empirisch, Beziehungen zwischen Kennwerten der vorgesehenen Kornzusammensetzung (z. B. Körnungsziffer, F-Wert, Wasseranspruchswerte) und dem Wassergehalt W des Betons für eine bestimmte Konsistenz aufgestellt. Mit dem Wasserzementwert $w = W/Z$ läßt sich damit der zugehörige Zementgehalt errechnen.

Der Luftgehalt P wird geschätzt, und zwar im allgemeinen zu $P = 15 \text{ dm}^3/\text{m}^3$. Für weichen, feinkörnigen und sandreichen Beton ist ein höherer Schätzwert, etwa 20 oder $30 \text{ dm}^3/\text{m}^3$, angebracht, und für Beton mit einem luftporenbildenden Zusatzmittel ist der vorgesehene Luftgehalt einzusetzen. Aus der Stoffraumgleichung ergibt sich, da Z , W und P bzw. die Rein- und Rohdichten bekannt sind, der Zuschlaganteil G .

Auf diese Weise kann die Zusammensetzung von Normalbeton mit angestrebter Druckfestigkeit und Konsistenz für die Praxis hinreichend genau entworfen werden. An diese Berechnung dürfen jedoch keine überspitzten Forderungen gestellt werden, weil ein Teil der Größen über empirische Beziehungen erhalten werden und dadurch mit mehr oder weniger großen Streuungen behaftet sind und weil auch die Bestimmung der Rohdichte des Betons und der Rein- bzw. Rohdichte der Ausgangsstoffe bei vertretbarem Auf-

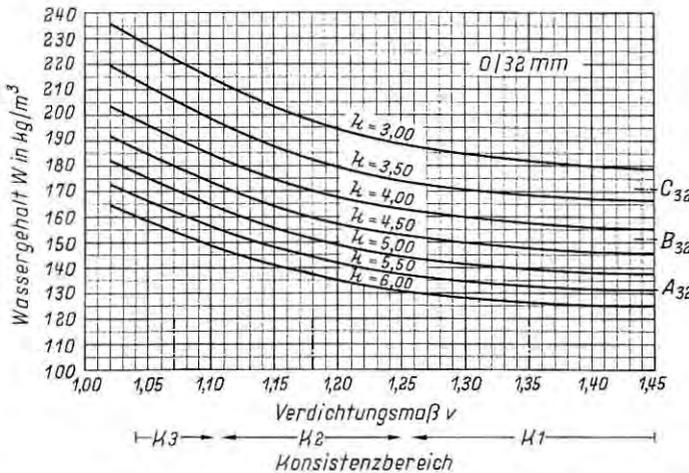


Bild 3 Beziehung zwischen Verdichtungsmaß v (Konsistenz), Körnungsziffer k und Wassergehalt W (kg/m^3) des verdichteten Frischbetons mit Zuschlaggemischen $0/32 \text{ mm}$. An der rechten Ordinate sind die Körnungsziffern k der Grenzsieblinien A_{32} , B_{32} und C_{32} nach DIN 1045 mit $k = 5,48, 4,20$ und $3,30$ vermerkt.

wand gewisse Fehler enthalten kann. Aus diesem Grunde ist vorgeschrieben, daß vor Beginn einer Bauausführung durch eine Eignungsprüfung des Betons überprüft wird, ob der Beton mit der errechneten Zusammensetzung verarbeitbar ist und ob die übrigen, der Berechnung zugrunde gelegten Eigenschaften vorhanden sind.

Die Rohdichte des Normalbetons ist bei der Berechnung keine Zielgröße, sondern sie wird durch die jeweilige Betonzusammensetzung bedingt. Nach der Stoffraumgleichung entspricht sie der Summe von Z, G und W. Die Rohdichte für Normalbeton liegt nach DIN 1045 zwischen 2000 und 2800 kg/m³; bei üblichem Zuschlag und Beton findet sie sich jedoch meist bei 2400 ± 200 kg/m³. Demgegenüber werden sowohl bei Schwerbeton (über 2800 kg/m³) als auch bei Leichtbeton (unter 2000 kg/m³) neben Festigkeit und Konsistenz jedoch ganz bestimmte Forderungen an die Größe der Rohdichte gestellt.

Da die Festigkeit des Leichtzuschlags nicht größer als die des Zementsteins ist, kann beim Entwurf der Zusammensetzung eines Leichtbetons mit bestimmter Druckfestigkeit nicht vom Wasserzementwert bzw. von W und Z als maßgeblichen Größen wie beim Normal- und Schwerbeton ausgegangen werden. Man ist daher bislang auf die empirische Auswertung von Versuchsreihen angewiesen. Bei künstlich hergestellten Leichtzuschlägen, wie z. B. Blähton und Blähschiefer, sind solche Auswertungen im allgemeinen durch das Herstellerwerk vorgenommen worden, so daß ein Entwurf der Mischung anhand der vom Herstellwerk zur Verfügung gestellten Unterlagen möglich ist. Darüber hinaus muß ebenfalls auf Erfahrungen zurückgegriffen werden, wenn die Rohdichte von gefügedichtem Leichtbeton aus Leichtzuschlag durch Einführen eines sehr hohen Luftporengehalts weiter gesenkt werden soll, ebenso auch wenn haufwerksporiger Leichtbeton mit bestimmter Druckfestigkeit und Rohdichte hergestellt wird.

Die Stoffraumrechnung läßt sich dann nicht für die Berechnung von Mischungen für Normalbeton verwenden, wenn die Zusammensetzung anschließend durch spezielle Verarbeitungsverfahren geändert wird. Das trifft bei Vakuumbeton zu, bei dem während und nach dem Verdichten ein Teil des Anmachwassers wieder abgesaugt wird. Dadurch ergibt sich in der an die behandelte Fläche angrenzenden Zone eine gegenüber der Ausgangsmischung deutlich höhere Dichtigkeit und Festigkeit, vor allem bei weichem Ausgangsbeton. Auch Spritzbeton weist durch den Rückprall, vor allem der größeren Zuschlagkörner, eine von der Ausgangsmischung abweichende Zusammensetzung auf.

Das Ausmaß der zu erwartenden Änderung in den Betoneigenschaften durch solche Verarbeitungsverfahren läßt sich nur aufgrund von Erfahrungen abschätzen. Daher sind bei Vakuumbeton und bei Spritzbeton Eignungsprüfungen unerlässlich, bei denen die besonderen Gegebenheiten des Bauwerks zu berücksichtigen sind.

3. Ausgangsstoffe des Betons

3.1. Zement

Nach umfangreichen Untersuchungen erschien 1970 die neue deutsche Zementnorm DIN 1164, die den praktischen Belangen der

Zementhersteller und -anwender mehr als vordem Rechnung trägt. Als wichtigste Neuregelung wurde dabei für die Festigkeitsklassen nicht nur eine untere Mindestfestigkeit festgelegt, wie dies zuvor der Fall war und in allen anderen Zementnormen der Welt noch üblich ist, sondern zusätzlich eine obere Grenzfestigkeit eingeführt (mit Ausnahme der obersten Klasse). Damit wurde ein bedeutender Schritt zur Vergleichmäßigung der Zementfestigkeit vollzogen, der der Industrialisierung des Bauens mit Beton Rechnung trägt. Der Vorteil einer solchen oder ähnlichen Regelung ist inzwischen auch im Ausland erkannt worden, wie die Entwürfe der neuen französischen und holländischen Zementnormen erkennen lassen.

Erhebliche Probleme wirft die von der Europäischen Gemeinschaft veranlaßte Harmonisierung der europäischen Zementnormen auf, weil die Rohstoffvorkommen, die Herstellverfahren und die Verarbeitung des Zements sowie der Grad der Industrialisierung und die auch klimatisch oder topographisch bedingten Bauweisen regional sehr unterschiedlich sind.

Nach umfangreichen Entwicklungsarbeiten, die auch Langzeitversuche unter Bedingungen der Praxis einschlossen, wurden in der neuen deutschen Zementnorm auch die Anforderungen an Zement mit hohem Sulfatwiderstand und mit niedriger Hydratationswärme festgelegt. Zu den Maßnahmen, die zur Vermeidung schädigender Alkalireaktion bei Verwendung empfindlichen Zuschlags beitragen (siehe Abschnitt 3.2.1, letzter Absatz), gehört auch die Verwendung von Portland- oder Hochofenzement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt, von sogenanntem NA-Zement. Den in einem Ergänzungserlaß zur Zementnorm festgelegten Anforderungen an diesen Sonderzement liegen weitreichende, auf die deutschen Verhältnisse abgestimmte Forschungsarbeiten zugrunde.

Nach entsprechenden Voruntersuchungen und Prüfungen wurde jetzt ein sogenannter „Schnellzement“ bauaufsichtlich zugelassen, der im wesentlichen einem Portlandzement der Festigkeitsklasse Z 450 F entspricht, jedoch bei verkürzter Verarbeitungszeit eine deutlich höhere Anfangsfestigkeit in den ersten Stunden aufweist. Dieser Zementtyp ist in den USA entwickelt worden und dort schon seit einiger Zeit auf dem Markt.

Überlegungen und Untersuchungen zur Entwicklung eines sogenannten „Quellzements“, mit dem insbesondere das Schwinden kompensiert werden kann, reichen mehr als ein halbes Jahrhundert zurück und wurden zunächst – allerdings mit sehr wechselhaftem Erfolg – vor allem in Frankreich durchgeführt. Seit Mitte der 60er Jahre ist in den USA, Rußland und Japan ein das Schwinden kompensierender Quellzement auf dem Markt, dessen Anwendung dort zunächst schnell zunahm, dessen Marktanteil in den letzten Jahren jedoch konstant bei nur einigen Prozenten liegt. Das mag daran liegen, daß dieser Quellzement einer intensiven feuchten Nachbehandlung bedarf, durch die die Gefahr von Schäden infolge Schwindens auch bei normalem Zement vermindert wird. Wie fortwährende Anfragen zeigen, liegt ebenso bei uns ein ständiger, wenn auch vermutlich nicht gerade hoher Bedarf für einen solchen Sonderzement vor.

Je nach den Anforderungen, die an einen Beton gestellt werden, muß der Zuschlag in verschiedenen Korngruppen mit begrenzten Anteilen an Unter- und Überkorn in den Mischer gegeben werden. Damit wird erreicht, daß die Kornverteilung des vorgesehenen Zuschlaggemisches in den einzelnen Mischungen ohne größere Schwankungen eingehalten wird. Die Festlegungen für die zu verwendenden Korngruppen sind in DIN 1045 so gefaßt, daß keine Schwierigkeiten entstehen sollten, wenn aus einzelnen Zuschlagvorkommen z. B. praktisch nur Sand der Korngruppe 0/1 mm anstatt 0/2 mm oder 0/4 mm geliefert werden kann. Damit entsteht dann ein, unter bestimmten Voraussetzungen ebenfalls zulässiges Zuschlaggemisch mit Ausfallkörnung anstelle eines solchen mit stetig verlaufender Sieblinie.

In manchen Gebieten kann der Anteil des Feinstsandgehalts in der untersten Korngruppe so hoch sein, daß der Richtwert für den Mehlkorngesamtgehalt des Betons überschritten wird. Ob dem Überschreiten des Richtwerts auch dann ein sehr bedeutsamer beton-technologischer Einfluß beizumessen ist, wenn der Gehalt an abschlämmbaren Stoffen in Grenzen bleibt, ist noch nicht hinreichend abgeklärt. Ohnehin legen die nunmehr 5jährigen Erfahrungen mit der neuen DIN 1045 und DIN 4226 die Frage nahe, ob die Anforderungen an den Zuschlag betontechnologisch und gleichermaßen wirtschaftlich optimal sind.

Unterschiedlich beurteilt wird die Aussagekraft der Frostprüfverfahren, die mit der DIN 4226 neu eingeführt wurden und die eine Unterscheidung in „hohen“ und „mäßigen“ Frostwiderstand des Zuschlags ermöglichen. Als Maßstab muß das Verhalten in der Praxis gelten, dessen Übertragbarkeit jedoch — wie bei allen Langzeitvorgängen — stets problematisch ist. Ohne auszuschließen, daß sich die derzeitigen Frostprüfverfahren durch gewisse Modifizierungen verbessern lassen, scheint den Verfassern die in DIN 4226 festgelegte Regelung in ihrer Grundtendenz sowohl prüftechnisch als auch für die Beurteilung des Verhaltens in der Praxis geeignet.

Bei der eingehenden Überprüfung alkaliempfindlicher Zuschläge, wie sie in einigen eng begrenzten Bereichen Norddeutschlands vorkommen können, hat sich herausgestellt, daß hierzu in anderen Ländern gewonnene Erfahrungen nicht ohne weiteres übertragen werden können, sondern daß dabei die besonderen Verhältnisse unserer Vorkommen berücksichtigt werden müssen. Die 1974 herausgegebenen „Vorläufigen Richtlinien für vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliwirkung im Beton“ tragen dem voll Rechnung.

3.2.2. Zuschlag für Schwerbeton

Beton mit hoher Rohdichte wird vorwiegend als Abschirmstoff gegen Kernstrahlung verwendet. Schwerbeton wird dadurch hergestellt, daß die sonst üblichen Zuschläge ganz oder teilweise durch „schwere“ Zuschläge mit hoher Rohdichte ersetzt werden. Hierfür kommen Baryt und bestimmte Eisenerze sowie Schlacken und Stahlgranalien in Betracht. Kristallwasserhaltige Gesteine, wie z. B. Limonit und Serpentin, werden als Zuschlag verwendet, um die Neutronenabsorption zu verbessern.

3.2.3. Zuschlag für Leichtbeton

Eine verminderte Rohdichte zwischen 800 und 2000 kg/m³ erreicht man bei gefügedichtem Konstruktions-Leichtbeton durch Verwendung künstlich hergestellter, poriger Leichtzuschläge, wie z. B. Blähton und Blähschiefer. Die Leichtzuschläge sind mehr oder weniger wassersaugend. Ihre Festigkeit ist beträchtlich niedriger als die der dichten Zuschläge, und zwar ist sie um so kleiner, je



Bild 5 Schnitt durch ein Leichtzuschlagkorn (Blähton) mit gleichmäßig verteilten, feinen Poren

höher die Porosität ist. Die Porosität von Leichtzuschlägen für Leichtbetone mit einer Druckfestigkeit von mindestens 300 kp/cm² beträgt im allgemeinen höchstens 50 bis 60 Vol.-%.

Die von den saugfähigen Leichtzuschlagkörnern während des Mischens und bis zum Verdichten des Betons aufgenommene Wassermenge muß dem Anmachwasser zugeschlagen werden, da anderenfalls der Beton während der Verarbeitung ansteift. Andererseits muß dieser Anteil vom Wassergehalt zum Errechnen des wirkamen Wasserzementwerts abgezogen werden. Dazu ist es erforderlich, die Wasseraufnahme des Leichtzuschlags zeitabhängig zu bestimmen. Für eine Beurteilung hat sich die Wasseraufnahme nach 30 Minuten und nach 24 Stunden als besonders aussagekräftig herausgestellt.

Die Zusammensetzung eines Konstruktions-Leichtbetons bestimmter Rohdichte und Festigkeit kann noch nicht ausreichend vorausberechnet werden, weil der Einfluß der Korngröße und Festigkeit des Leichtzuschlagkorns auf die Druckfestigkeit des Betons nicht zufriedenstellend geklärt erscheint (siehe auch Abschnitt 2). Die bisher entwickelten Prüfverfahren für die Korneigenfestigkeit des

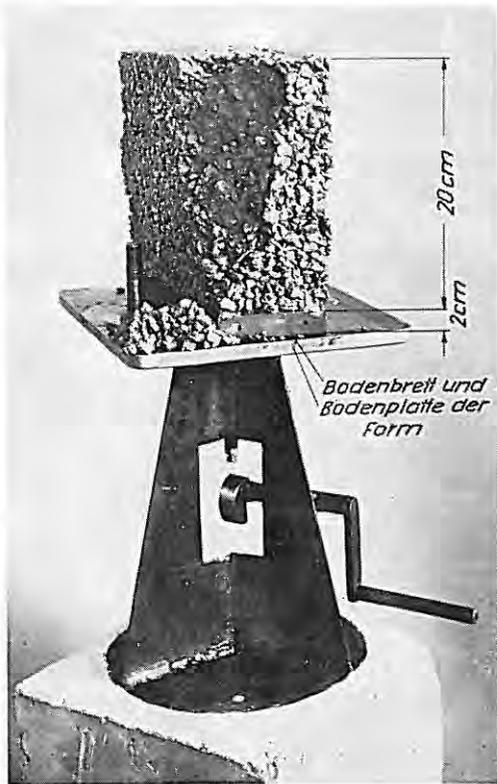


Bild 6
 Prüfung der Standfestigkeit von frisch entformten Proben 10 cm · 25 cm · 20 cm aus haufwerksporigem Leichtbeton, die mit unterschiedlicher Feinmörtelkonsistenz und Verdichtungseinwirkung hergestellt wurden. Einstürzen der Probe auf dem Schocktisch nach 10 Aufschlägen mit einer Fallhöhe von 2 mm. (Solche Probekörper mußten mindestens 4 Aufschläge widerstehen, damit Mauersteine aus dem Leichtbeton beim Seiltransport unbeschädigt blieben)

Leichtzuschlags eignen sich meist für die Überwachung der Gleichmäßigkeit bei der Produktion.

Für haufwerksporige Leichtbetone, wie zu Wänden nach DIN 4232 und Betonwaren, können sowohl porige Leichtzuschläge als auch dichte Zuschläge verwendet werden. Die Rohdichte dieser Betone kann in dem weiten Bereich von 500 bis 2000 kg/m³ liegen. Für haufwerksporige Betone werden eng begrenzte Korngruppen, z. B. 4/8 mm oder 8/16 mm, mit wenig klebrig-weichem Feinmörtel gemischt, so daß die Hohlräume im Kornhaufwerk nicht gefüllt, sondern die Körner lediglich umhüllt und verkittet werden.

3.3. Zusatzmittel und Zusatzstoffe

Zusatzmittel werden in flüssiger oder pulveriger Form dem Beton in so geringen Mengen zugesetzt, daß sie bei der Stoffraumrechnung nicht ins Gewicht fallen. Dagegen müssen Zusatzstoffe, bei denen es sich meist um größere Mengen fein aufgeteilter mineralischer Stoffe, manchmal auch um organische Stoffe handelt, als Volumenbestandteile berücksichtigt werden.

Zusatzmittel und -stoffe dürfen nur dann für Beton nach DIN 1045 verwendet werden, wenn sie ein amtliches Prüfzeichen (Prüf-

bescheid) besitzen, was eine vorausgehende Untersuchung und eine ständige Überwachung bedingt. Dennoch setzt ihre Verwendung stets eine Eignungsprüfung voraus.

Die Betonzusatzmittel sind derzeit nach 6 Wirkungsgruppen in Verflüssiger, Luftporenbildner, Dichtungsmittel, Erstarrungsverzögerer, Erstarrungsbeschleuniger und Einpreßhilfen unterteilt. Während baupraktisch in bestimmten Fällen auf die Verwendung von Luftporenbildnern, Erstarrungsverzögerern und Einpreßhilfen nicht verzichtet werden kann, wird die Erfordernis und Wirksamkeit von Betondichtungsmitteln oft bezweifelt.

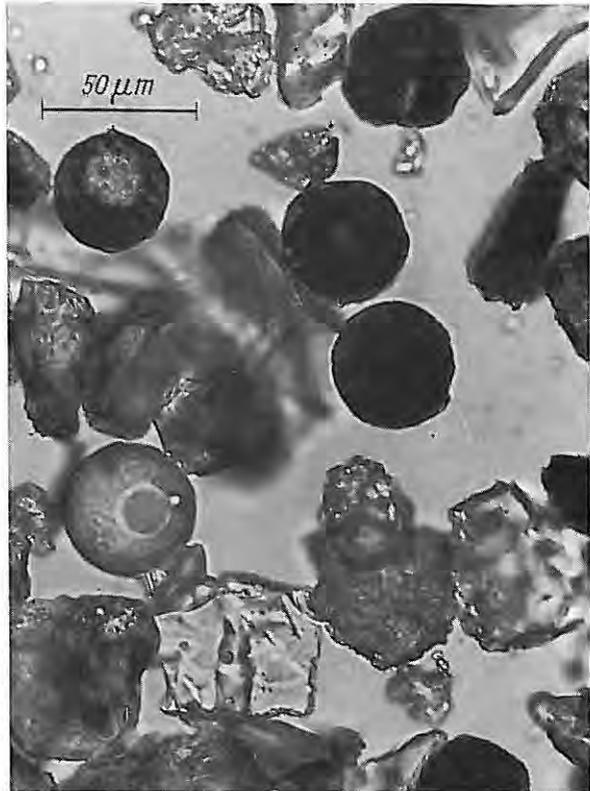


Bild 7 Mikroskopisches Bild von kugelförmigen Flugaschepartikeln und unregelmäßig geformten Zuschlagkörnern der Kornklasse 30/40 µm eines flugaschehaltigen Betons

Mit den in den letzten Jahren entwickelten „Superverflüssigern“ (Fließmitteln) ist es möglich, vorher nur plastischen Beton vorübergehend so zu verflüssigen, daß beim Einbau auf eine eigentliche, sonst notwendige Verdichtung verzichtet werden kann. Die Entwicklung von Zusatzmitteln dürfte noch nicht abgeschlossen sein.

Neuere Untersuchungen befassen sich mit „Stabilisierern“, die den Beton geschmeidiger machen und ein Entmischen oder Wasserabsondern verhindern sollen.

Mit Zusatzstoffen können die Eigenschaften des frischen und erhärteten Betons beeinflusst, unter Umständen auch wirtschaftlicher erzielt werden. Hierzu zählen z. B. latent-hydraulische Zusatzstoffe, wie gemahlener Traß oder Steinkohlenflugasche.

4. Herstellung des Betons

4.1. Abmessen der Betonbestandteile

Nach DIN 1045 müssen der Zement, die Korngruppen des Zuschlags und das Zugabewasser mit einer Genauigkeit von 3 Gew.-% zugegeben werden. Wenn z. B. in einem ungünstigen Fall der Zementgehalt um 3 % zu niedrig und der Wassergehalt um 3 % zu hoch abgemessen wird, kann dabei die Druckfestigkeit des Betons um etwa 30 kp/cm² gegenüber dem Sollwert kleiner ausfallen.

Beim Abmessen muß die Oberflächenfeuchte des Zuschlags berücksichtigt werden, weil anderenfalls zu wenig Zuschlag und zu viel Wasser in die Mischung gelangen können. Beim Zuschlag hält sich der dadurch bedingte Abmeßfehler im allgemeinen in den zulässigen Grenzen von $\pm 3\%$. Demgegenüber führt eine Vernachlässigung der Oberflächenfeuchte des Zuschlags beim Zugabewasser zu größeren Abmeßfehlern mit beträchtlichen Folgen für die Eigenschaften des Betons. Zum Beispiel kann 1 Gew.-% Oberflächenfeuchte größenordnungsmäßig mehr als 10 % des Anmachwassers ausmachen, wodurch die Betonfestigkeit um etwa 50 kp/cm² vermindert würde. Um auch beim Anmachwasser die in DIN 1045 vorgeschriebene Abmeßtoleranz einzuhalten, müßte die Oberflächenfeuchte des Zuschlags mit einer Genauigkeit von 0,3 Gew.-% bestimmt und berücksichtigt werden. Da die maximale Oberflächenfeuchte der mittleren und groben Korngruppen verhältnismäßig klein ist und somit nicht in weiten Grenzen schwanken kann, kommt es vor allem darauf an, die Oberflächenfeuchte der Sandkorngruppen fortlaufend zu überprüfen.

An größeren, stationären Mischanlagen haben sich Meßgeräte, die die Oberflächenfeuchte des Sandes laufend mittels elektrischer Größen (z. B. durch Leitfähigkeits- bzw. Widerstandsmessung) oder durch Neutronenabsorption bestimmen, hinsichtlich ihrer Genauigkeit als brauchbar erwiesen, sofern u. a. eine konstante Schüttdichte des Sandes während der Messung durch besondere Maßnahmen erreicht bzw. Unterschiede durch zusätzliche Messungen (z. B. γ -Strahlenabsorption) kompensiert werden.

Eine andere Regelung wird über das Messen verschiedener Frischbetoneigenschaften im Mischer angestrebt, z. B. durch Messen des elektrischen Widerstands des Betons, der Leistungsaufnahme des Mischermotors oder des Verdrängungswiderstands des bewegten Betons.

Durch alle diese Maßnahmen, zu denen nicht zuletzt die Beurteilung nach Augenschein durch einen erfahrenen Mischmaschinenführer gehört, soll erreicht werden, daß die erforderliche Konsistenz

des Betons eingehalten und dabei ein bestimmter Wassermenge-Wert nicht überschritten wird. Zur Nachprüfung des Wassergehalts, des Wassermenge-Werts oder der Zusammensetzung des Frischbetons insgesamt sind einige mehr oder weniger aufwendige und befriedigende Verfahren entwickelt und genormt worden. Ihre Zuverlässigkeit hängt außer von einer genauen Verfahrenstechnik von der Einhaltung bestimmter Gegebenheiten im Mischungsaufbau selbst ab, z. B. bei der Frischbetonanalyse (DIN 52 171) von einem zutreffenden Gehalt an Feinstsand oder bei dem Verfahren nach Thaulow (DIN 1048) unter anderem von dem als mehr oder weniger zutreffend vorausgesetzten Mischungsverhältnis von Zement zu Zuschlag und deren Rein- bzw. Rohdichten.

4.2. Mischen und Frischbetoneigenschaften

Gleichmäßigkeit und Intensität des Vermischens der Bestandteile werden weitgehend durch die Konstruktion des Mixers, den Füllungsgrad und die Mischergeschwindigkeit beeinflusst. Die DIN 1045 läßt bei Mixern mit „besonders guter Mischwirkung“ eine Mischdauer von nur 0,5 Minuten zu und verlangt bei allen übrigen Mixern wenigstens 1,0 Minute nach Zugabe aller Stoffe. Wie verschiedene Untersuchungen über den Einfluß der Mischdauer erkennen ließen, ist für eine homogene Mischung und ein gleichmäßiges Durchmischen des Zementleims, auch für ein Untermischen mengenmäßig geringerer Bestandteile, wie z. B. pulveriger Zusatzmittel, eine Mischdauer von wenigstens etwa 1,5 Minuten nötig. Bei kürzerer Mischzeit, insbesondere nur 0,5 Minuten, wird die aufgrund der Zusammensetzung erreichbare Güte des Betons nicht verwirklicht, was bei Kompensation durch eine bessere und

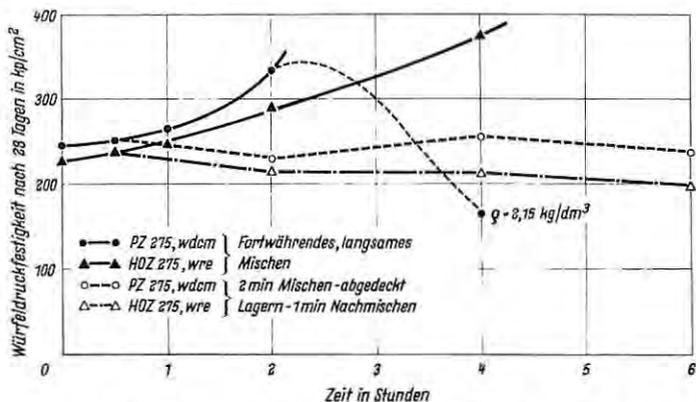


Bild 8 Die Betone aus 240 kg PZ/m³ oder 240 kg HOZ/m³ mit einem Wassermenge-Wert von 0,74 und einem Ausbreitmaß von 50 cm wurden zunächst 2 min bei normaler Mischgeschwindigkeit in einem geschlossenen Zwangsmischer gemischt. Anschließend folgte langsames Weitermischen mit halber Mischgeschwindigkeit oder Lagern der Betone. Die zu verschiedenen Zeiten hergestellten 20-cm-Würfel stammten aus je einer gesondert hergestellten Mischung. — Die Betone versteiften mit der Zeit. Solange sie mit Innenrüttlern noch verdichtet werden konnten, stieg die Druckfestigkeit durch fortwährendes Mischen an bzw. fiel nach längerem Lagern nicht oder nur wenig ab.

teurere Ausgangsmischung dennoch wirtschaftlich sein kann, weil die Zahl der Mischerspiele je Stunde höher ist.

Immer wieder wird versucht, durch intensives Vormischen von Zementleim oder Mörtel den Zement „besser aufzuschließen“. Dadurch läßt sich die Anfangsfestigkeit steigern. Der Festigkeitszuwachs gegenüber normal gemischtem Beton ist jedoch nach 28 Tagen meist gering, so daß sich der erhöhte Mischaufwand nicht lohnt. Ein intensives Mischen liefert allerdings einen stabilen, sich nicht entmischenden Zementleim, was beim Auspressen sowie für Ausguß- oder Unterwasserbeton von Vorteil ist. Durch wesentlich längeres Mischen versteift der Beton, liefert jedoch dann, wenn er noch verarbeitet und verdichtet werden kann, eine höhere Druckfestigkeit.

Ein Verfahren, mit dem die Verarbeitbarkeit des Frischbetons insgesamt definiert und beurteilt werden kann, ist noch nicht bekannt und wird sich praxistgerecht auch kaum entwickeln lassen. Vereinfacht ausgedrückt sind für die Verarbeitbarkeit der Zusammenhalt des Frischbetons (Entmischungsneigung) sowie seine Verformbarkeit (Verdichtungswiderstand) maßgebend. Untersuchungen, um anhand eines Stufenmodells zunächst die rheologischen Eigenschaften des Zementleims und dann die des Frischbetons zu erfassen, sind bislang über positive Ansätze nicht hinausgekommen. So wird man sich zunächst weiterhin mit der Kennzeichnung der „Konsistenz“ (Verformbarkeit, Beweglichkeit) begnügen müssen, für deren versuchsmäßige Bestimmung zahlreiche, allerdings nicht immer praxistgerechte Verfahren und Geräte vorgeschlagen worden sind. Die bei uns genormten Verfahren (Verdichtungsmaß und Ausbreitmaß nach DIN 1048) werden den Anforderungen der Praxis weitgehend gerecht.



Füllung vollständig
verdichtet

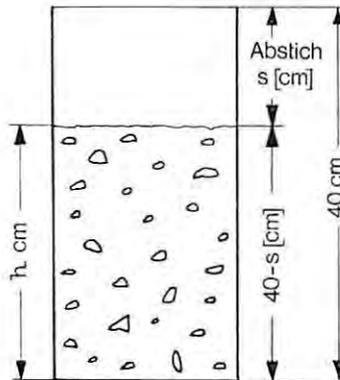


Bild 9 Kennzeichnung der Konsistenz mit dem Verdichtungsmaß $v = 40/h = 40/40 - s$

4.3. Verdichten und Nachbehandeln

Die in den 30er Jahren entwickelte und zwischenzeitlich vervollkommnete Rütteltechnik erlaubt die zuvor praktisch nicht zu bewältigende Verdichtung auch steifen und grobkörnigen Betons auf wirtschaftliche Weise. Durch umfangreiche Untersuchungen sind heute die maßgeblichen Einflußgrößen, wie Frequenz, Amplitude und Massen des Rüttlers, geklärt, so daß zuverlässige Aussagen über Wirkungsbereich und Verdichtungsgrad gemacht werden können. Der für die Praxis nutzbare Stand der Rütteltechnik ist in

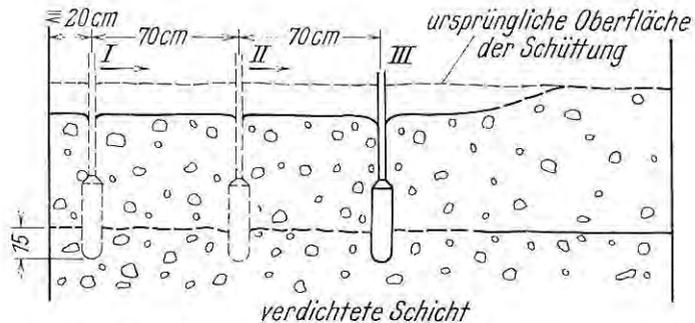


Bild 10 Richtiges Einsetzen eines kräftig wirkenden Innenrüttlers: gleichmäßiger Abstand der Einsetzstellen und 15 cm tiefes Einführen in die untere verdichtete Frischbetonlage

der im Entwurf vorliegenden DIN 4235 (Januar 1976) in 5 Teilen zusammengefaßt. Diese Norm ist eine Anleitung zur Rüttelverdichtung von Konstruktionsbeton mit geschlossenem Gefüge

Die Rütteltechnik läßt sich darüber hinaus auch für andere Anwendungsbereiche mit Erfolg nutzen, wenn sie dabei auf die speziellen Gegebenheiten abgestimmt ist. Das gilt z. B. für die Verdichtung von haufwerksporigem Beton, von grobkörnigem Mass beton und von tausalzbeständigem Beton mit künstlich eingeführten Mikro-Luftporen. Es steht auch die Frage an, ob durch die Verwendung von Fließmitteln (siehe Abschnitt 3.3) die Rüttelverdichtung aus manchen Gebieten der Betonherstellung verdrängt werden kann. Dabei ist zu beachten, daß man u. U. einen höheren Gehalt an natürlichen Luftporen in Kauf nehmen muß.

Damit der Beton die aufgrund seiner Zusammensetzung möglichen Eigenschaften nach ordnungsgemäßem Herstellen und Einbauen auch erhält, ist eine angemessene Nachbehandlung erforderlich. Das gilt insbesondere für großflächige, dünne Bauteile in exponierter Lage bei stark austrocknenden Umweltbedingungen. Das Gesamtwasser des Frischbetons reicht für die Erhärtung immer aus, so daß sich hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung die Nachbehandlung auch darauf beschränken kann, ein vorzeitiges Austrocknen zu verhindern, z. B. durch Abdecken mit Folien oder Aufsprühen sogenannter Nachbehandlungsfilme.

Gefüge und Festigkeit des erhärteten Betons

5. Betongefüge

Durch die Hydratation des Zements geht der flüssige Zementleim in den festen Zementstein über. Dieser Vorgang ist stark von der Temperatur sowie von der Art und Feinheit des Zements abhängig und läuft in den ersten Tagen relativ schnell, dann immer langsamer werdend ab, so daß er bei ausreichendem Feuchtigkeitsangebot auch nach Jahrzehnten noch nicht völlig abgeklungen ist. Der Zementstein verklebt und verkittet die einzelnen Zuschlagkörner miteinander und füllt die im Zuschlaghaufwerk vorhandenen Zwickel aus. Man kann daher Beton als einen Zweiphasen-Verbundstoff auffassen, bei dem die Zuschlagkörner in eine Matrix gebettet sind. Zur Matrix rechnet man heute meistens nicht nur den Zementleim, sondern den Feinmörtel, d. h. den um Feinsand, Zusatzstoff, Zusatzmittel und Mikroluftporen verlängerten Zementleim.

5.1. Zementstein

Zement löst sich nach dem Anmachen nicht im Wasser auf (wie z. B. Zucker oder Salz), sondern von der Oberfläche jedes einzelnen Zementkorns wachsen in den mit Anmachwasser gefüllten Raum Hydratationsprodukte, die als Zementgel bezeichnet werden. Das Zementgel besteht aus ineinander verfilzten, submikroskopisch kleinen Kristallen, deren Zwischenräume als Gelporen bezeichnet werden. Zement benötigt zu seiner vollständigen Hydratation etwas unter 40 Gew.-% Anmachwasser; davon werden allerdings nur etwa 25 Gew.-% chemisch gebunden, während der Rest als verdampfbare Wasser in den Gelporen verbleibt. Bei einem Wasserzementwert etwas unter 0,40 füllen die Hydratationsprodukte den Raum, den beim Anmachen der Zement und das Wasser eingenommen hatten, vollständig aus. Bei einem Wasserzementwert über 0,40 verbleiben somit auch bei vollständiger Hydratation ursprünglich mit Anmachwasser gefüllte Hohlräume, die man als Kapillarporen bezeichnet. Der Durchmesser dieser Kapillarporen ist rd. 1000mal so groß wie der der Gelporen. Liegt der Wasserzementwert deutlich unter 0,40, so können die Zementkörner auch bei ständiger Wasserlagerung nicht vollständig hydratisieren.

Anteil und Größe der Poren bestimmen viele Eigenschaften des Zementsteins in starkem Maße. So nimmt beispielsweise die Druckfestigkeit mit zunehmender Porosität ab nach der Formel

$$D = D_0 (1 - p)^n$$

Dabei ist p die Gesamtporosität, die sich aus dem verdampfbaren Wasser errechnet, D_0 ist die theoretische Druckfestigkeit des porenfreien Zementsteins, deren Größenordnung 3000 kp/cm^2 beträgt, und der Wert für den Exponent n liegt zwischen 2,5 und 3,0. Nach der gleichen Gesetzmäßigkeit nimmt mit zunehmender Gesamtporosität auch der Elastizitätsmodul ab; dabei liegt E_0 , der theoretische Elastizitätsmodul des porenfreien Zementsteins, in der Größenordnung von $700\,000$ bis $800\,000 \text{ kp/cm}^2$. Dagegen ist für die Dich-



Bild 11 Neubildungen im Anmachwasser (Zementgel) bei der Hydratation der Klinkerkörner (Aufnahme mit dem Raster-Elektronenmikroskop)

tigkeit des Zementsteins nur der Anteil der Kapillarporen maßgebend, weil die Gelporen einen so geringen Durchmesser haben, daß sie praktisch wasserundurchlässig sind.

5.2. Verbund

Ein vollflächiger und möglichst fester Verbund zwischen Matrix und Zuschlagkörnern ist notwendig, um hohe Gebrauchseigenschaften des Betons zu erreichen. Schädlich sind insbesondere störende Zwischenschichten, z. B. mit Lehm verschmutzte Zuschlagkörner, sowie erstarrungs- oder erhärtungsstörende Bestandteile im Zuschlag. Der Verbund wird zudem von der morphologischen Beschaffenheit der Zuschlagkörner (Kornform und -größe; Oberflächenstruktur) und deren mineralischer Zusammensetzung mehr oder weniger stark beeinflusst. Sehr glatte und dichte Kornoberflächen ergeben einen weniger festen Verbund. Der günstige Einfluß kalkspathaltiger und zum Teil auch kieselsäurehaltiger Zuschläge wird dadurch erklärt, daß sie eine mikrorauhe Oberfläche besitzen und mit den Hydratphasen des Zementsteins chemisch-mineralogisch reagieren (Epitaxie). Es ist auch schon versucht

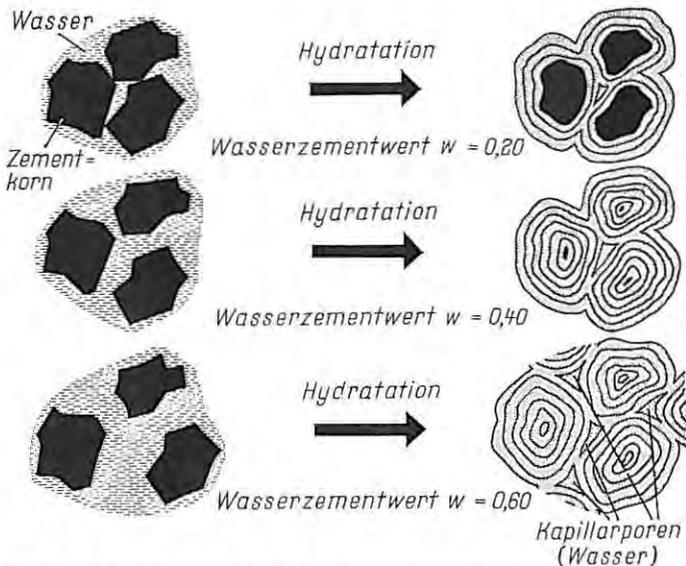


Bild 12 Hydratation von Zement bei verschiedenen Wasserzementwerten

worden, durch verschiedenartige Vorbehandlungen des Zuschlags eine den Verbund fördernde Kornoberfläche zu schaffen. Eine größere baupraktische Bedeutung werden solche Feststellungen aus wirtschaftlichen Gründen kaum erlangen, da Zuschlag als preiswertes Massengut weder hohe Frachtkosten noch teure Vorbehandlungen verträgt; so kommt neben dem Klassieren allenfalls ein Waschen in Betracht.

5.3. Tragwirkung

Wird Beton mit gleichmäßigem Druck einachsig beansprucht, so entsteht in seinem Innern eine räumliche Spannungsverteilung, weil Zuschlag und Matrix unterschiedliche Verformungseigenschaften aufweisen. Bei Normalbeton haben die Zuschlagkörner einen höheren Elastizitätsmodul als die Mörtelmatrix, d. h. sie sind steifer, und weil steifere Bestandteile bei verformenden Beanspruchungen gewissermaßen Kräfte „anziehen“, verläuft der Kraftfluß in auf Druck beanspruchtem Normalbeton von Zuschlagkorn zu Zuschlagkorn. Obwohl der Beton äußerlich nur auf Druck in einer Richtung beansprucht ist, entstehen in seinem Innern durch die räumliche Spannungsverteilung und durch das Umlenken der Drucktrajektorien beträchtliche Zugspannungen, und zwar vorwiegend senkrecht zur äußeren Druckrichtung in der Haftfuge (Verbundzone) zwischen groben Zuschlagkörnern und Mörtelmatrix.

Bei Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge kann der E-Modul der Mörtelmatrix größer sein als der der Leichtzuschläge. Daher erfolgt der Kraftfluß im Leichtbeton bevorzugt innerhalb der Matrixschichten. Auch bei einer solchen Spannungsverteilung entstehen

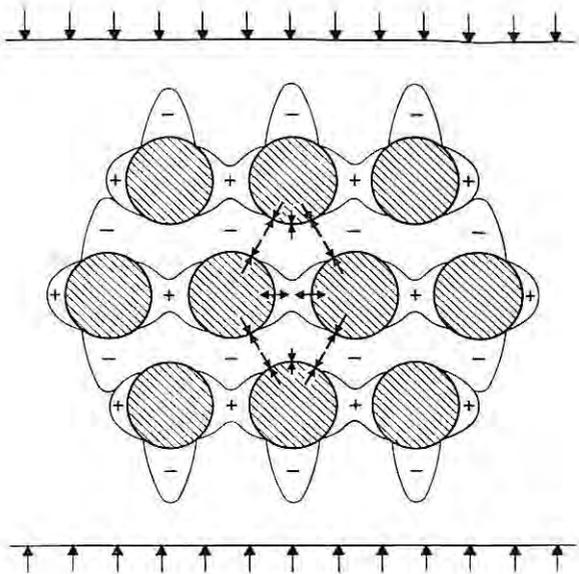


Bild 13 Spannungsverteilung in auf Druck beanspruchtem Normalbeton
 + Zugspannungsbereich - Druckspannungsbereich

senkrecht zur äußeren Druckrichtung beträchtliche Zugspannungen, jedoch nicht in der Verbundzone, sondern innerhalb der gröberen Leichtzuschlagkörner.

6. Betonfestigkeit

Der Einteilung des Betons in Festigkeitsklassen liegt die einachsige Druckfestigkeitsprüfung an Betonwürfeln von 20 cm Kantenlänge nach 28tägiger Normlagerung zugrunde. Dabei wird die maximal aufnehmbare Last (Bruchlast) ermittelt und auf die Ausgangsfläche des Prüfkörpers bezogen (Bruchspannung = Druckfestigkeit). Bei der überwiegenden Zahl aller betontechnologischen Untersuchungen über quantitative Einflüsse auf die Betonfestigkeit wird dieses Normprüfverfahren ausschließlich oder als Bezugsgröße angewandt. Hierauf werden andere Beanspruchungsarten, wie z. B. mehrachbiale Druckfestigkeit oder Zug-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit, ebenso bezogen wie einachsige Druckprüfungen an anderen Probekörpern, z. B. größere oder kleinere Würfel, Zylinder, Platten u. a. m.

Bei der einachsigen Druckbeanspruchung von Normalbeton kann man bis zum Bruch vier Stadien unterscheiden. Im Stadium I nimmt der Beton alle im Innern entstehenden Spannungen auf, ohne daß dadurch Anrisse entstehen. Der Beton verhält sich im Stadium I weitgehend elastisch. Stadium I umfaßt den Bereich von Null bis etwa 30 % der Druck-Bruchspannung. Im Stadium II, das von etwa 30 bis 50 % der Bruchspannung reicht, entstehen infolge der senkrecht zur Druckrichtung auftretenden Zugspannungen Verbund-

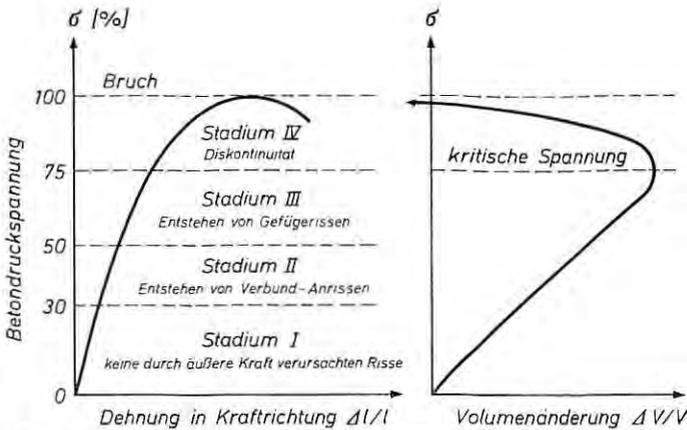


Bild 14 Stadien bis zum Bruch von einachsig auf Druck beanspruchtem Beton

Anrisse zwischen Mörtelmatrix und den auf Zug beanspruchten Stellen der groben Zuschlagkörner. Im Stadium III, das bis etwa 75 % der Bruchspannung reicht, erweitern sich die Verbund-Anrisse, und es bilden sich nach und nach Gefügerisse in der Mörtelmatrix. Im Stadium IV oberhalb etwa 75 % der Bruchspannung verbinden sich einzelne Gefügerisse zu einem Rißsystem, und es beginnt eine „Diskontinuität“ (Mangel an Zusammenhang), die schnell zunimmt und zum vollständigen Bruch (kein Zusammenhang mehr) führt. Das Volumen des einachsig auf Druck beanspruchten Betonprüfkörpers nimmt zunächst in den Stadien I bis III ständig ab, um dann in Stadium IV sehr schnell zuzunehmen. Den Wendepunkt in der Kurve der Volumenänderung, der den Übergang von Stadium III nach Stadium IV angibt, bezeichnet man als „Punkt der Diskontinuität“ und die zugehörige Spannung als „kritische“ Spannung.

Wird Normalbeton mehrachsig auf Druck beansprucht, so werden die bei einachsigem Druck auftretenden Zugspannungen teilweise oder ganz überdrückt, was sich in einer Steigerung der Festigkeit ausdrückt. Beton, der zweiachsig gleichmäßig auf Druck beansprucht wird (dritte Achse spannungsfrei), weist eine etwa 30 % größere Festigkeit auf (bezogen auf den gleichen Beton bei einachsiger Prüfung). Wird der Beton dreiachsig auf Druck beansprucht, so steigt seine Festigkeit auf das Mehrfache der einachsialen Festigkeit. Es bereitet bislang allerdings prüftechnische und auch definitionsmäßige Schwierigkeiten, bei dreiachsialer Druckbeanspruchung die „kritische“ Spannung und die Bruchspannung festzulegen und zu ermitteln. Liegen senkrecht zur Druckspannung äußere Zugbeanspruchungen vor, so erhält man verständlicherweise eine niedrigere Druck-Bruchspannung.

Sofern im folgenden nichts anderes angegeben ist, beziehen sich alle Angaben auf die einachsiale Betondruckfestigkeit, die die wichtigste und aussagekräftigste Kenngröße des Betons darstellt.

6.1. Betondruckfestigkeit

Der Einfluß der Betonzusammensetzung auf die Betondruckfestigkeit ist heute weitgehend erforscht und so in Nomogrammen (siehe Teil 1) und auch Formeln festgelegt, daß bei üblichen Ausgangsstoffen eine Vorausberechnung der Betonfestigkeit möglich ist.

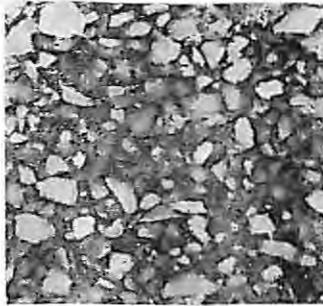
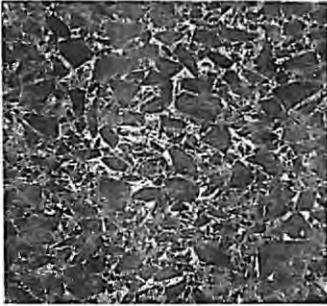
Wie umfangreiche Versuche an Betonen, die 30 Jahre und mehr im Freien lagerten, ergaben, läßt die Festigkeit des Betons mit der Zeit nicht nach, sondern nimmt beträchtlich zu. Die Festigkeitszunahme stieg um ein Mehrfaches an, wenn die 28-Tage-Festigkeit, wie bei hohem Wasserzementwert, relativ niedrig war und wenn langsam erhärtender Zement verwendet wurde.

Die Frühfestigkeit des Betons läßt sich durch verschiedene Maßnahmen wirkungsvoll steigern, so durch die Verwendung von Zement mit besonders hoher Anfangsfestigkeit (vgl. Abschnitt 3.1), durch einen verminderten Wasserzementwert, durch einen ermäßigten Zementleimgehalt (möglichst dünne Zementsteinschichten), durch besonders intensives Mischen, durch erhärtungsbeschleunigende Zusatzmittel, durch Erwärmen des Frischbetons (z. B. Dampfischen) sowie durch Wärme- oder Dampfbehandlung. Damit kann schon nach einigen Stunden eine Festigkeit erzielt werden, die ein Entformen, den Transport von Betonwaren und Fertigteilen sowie ein Vorspannen erlaubt. Erhärtungsbeschleunigende Zusatzmittel und ein anfängliches Erhärten können eine im Vergleich zu normal gelagertem Beton niedrigere 28-Tage-Festigkeit bewirken, vor allem dann, wenn wärmebehandelter Beton anschließend nicht feucht nachbehandelt wird. Beton, der in den ersten Tagen bei niedriger Temperatur langsamer erhärtet, weist demgegenüber meist eine höhere 28-Tage-Festigkeit auf, weil bei langsamer Erhärtung eine günstigere Struktur der Hydratationsprodukte entsteht. Für die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von den vorangegangenen Lagerungstemperaturen wurden sogenannte Reifefunktionen aufgestellt, die jedoch nur einen Anhaltswert liefern, weil die Bildung der Hydratationsprodukte hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Struktur je nach Temperaturhöhe unterschiedlich ist.

Die Herstellung von Beton der Festigkeitsklasse B_n 550 mit 28-Tage-Druckfestigkeiten zwischen 600 und 700 kp/cm² ist heute ohne ungewöhnliche Maßnahmen in Betonwerken und auf gut eingerichteten Baustellen zuverlässig möglich. Soll eine Druckfestigkeit von 1000 kp/cm² deutlich überschritten werden, so sind neben besonders ausgewählten Ausgangsstoffen und einer zweckentsprechenden Betonzusammensetzung auch besondere Behandlungen, wie z. B. Erhärten unter allseitigem Druck, erforderlich. Selbst wenn es gelingen sollte, Bauteile mit so hohen Betonfestigkeiten herzustellen, wären noch eine Reihe technischer und wirtschaftlicher Fragen für die Nutzung so hoher Betondruckfestigkeiten zu überprüfen.

Während die Prüfung am Betonwürfel in der Regel im Kurzzeitversuch durchgeführt wird, interessiert in der Praxis die Dauerfestigkeit bei lang anhaltender oder sogar wechselnder Belastung. Bei lang anhaltender ruhender Belastung wurde eine Dauerstandsfestigkeit gefunden, die etwa 15 bis 20 % unter der Kurzzeitfestigkeit liegt. Die Dauerfestigkeit unter wechselnder Last ist noch

350 kg PZ 475 je m³; W/Z-Wert = 0,32; 10 cm Würfel
 Nachverdichten, Erhärten zunächst unter Druck und niedriger Temperatur



Basaltbeton
 $R_{42} = 2,81 \text{ kg/dm}^3$
 $D_{42} = 1430 \text{ kp/cm}^2$
 $Z_{S_{42}} = 91 \text{ kp/cm}^2$

Quarzbeton
 $R_{42} = 2,49 \text{ kg/dm}^3$
 $D_{42} = 1229 \text{ kp/cm}^2$
 $Z_{S_{42}} = 61 \text{ kp/cm}^2$

Bild 15 Schnitt durch Betone mit besonders hoher Druckfestigkeit

niedriger. Da sie stark von der Belastungsfolge abhängt, untersucht man heute — und vermutlich in Zukunft verstärkt — die sogenannte Betriebsfestigkeit, bei der Höhe und Folge der Lastspiele den Beanspruchungen in ausgewählten Bauwerken entsprechen.

6.2. Betonzugfestigkeit

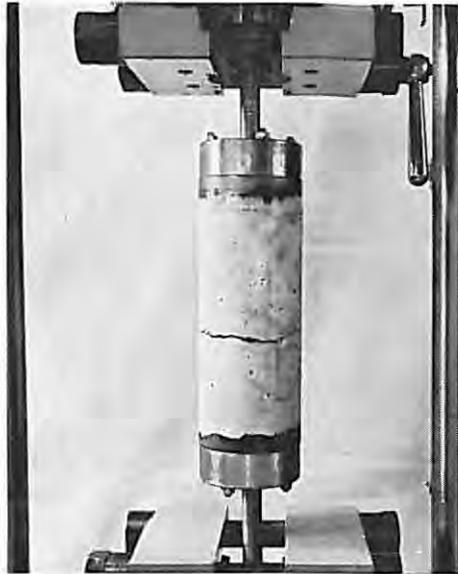
Schon frühzeitig hat man versucht, die Zugfestigkeit von Mörtel und Beton an besonders geformten Prüfkörpern zu bestimmen, z. B. an den sogenannten Achterkörpern. Insbesondere die sich dabei einstellenden Schwierigkeiten einer ordnungsgemäßen Einleitung der Zugkraft waren der Anlaß, sich mehr der Bestimmung der Biegezugfestigkeit zuzuwenden, die später durch die Spaltzugprüfung ergänzt wurde. Seit etwas mehr als einem Jahrzehnt stehen nun Kunstharzkleber zur Verfügung, mit denen das Problem einer gleichmäßig verteilten, zentrischen Zugbeanspruchung zufriedenstellend gelöst werden konnte.

Wie bei nahezu allen nichtmetallischen, anorganischen Stoffen ist auch beim Beton die Zugfestigkeit wesentlich geringer als die Druckfestigkeit. Sie beträgt im großen Durchschnitt deutlich weniger als 10 % der Druckfestigkeit. Mit der Druckfestigkeit nimmt zwar die absolute Zugfestigkeit ebenfalls zu, jedoch wesentlich weniger, so daß das Verhältnis Zugfestigkeit zu Druckfestigkeit um so kleiner ist, je höher die Betondruckfestigkeit ist.

Schon seit Jahrzehnten ist die Forschung bemüht, die Zugfestigkeit und die Zugbruchdehnung des Betons zu verbessern. Theoretisch wäre dies möglich, wenn die bei der Hydratation des Zements entstehenden Kristallfasern eine wesentlich größere Länge aufweisen würden. Dieses Ziel wurde bislang nicht erreicht, es erscheint sogar aus mehreren Gründen sehr fraglich, ob es überhaupt zu erreichen und nicht nur Wunschdenken ist.

Erfolgersprechender waren und sind daher Überlegungen und Versuche, die Eigenschaften des auf Zug beanspruchten Mörtels

Bild 16
Betonzylinder 15/30 cm
beim Zugversuch nach
Auftreten des Bruches



und Betons durch Zugabe von Fasern zu verbessern. Vom Prinzip her ist bereits der Stahlbeton ein mit langen Stahlfasern (Bewehrung) durchsetzter Beton-Verbundbaustoff. Wirtschaftlich von großem Vorteil ist dabei, daß die im Vergleich zu den Beton-Stoffkosten teure Bewehrung nur an jenen Stellen durchgehend und konzentriert angeordnet wird, an denen in einem Bauteil Zug auftritt, und daß sich der Grad der Bewehrung den Zugbeanspruchungen anpassen läßt.

Technisch bewährt und wirtschaftlich eingeführt hat sich auch der Asbestzement, bei dem etwa bis 1 cm lange Asbestfasern in Zementstein oder Feinmörtel eingebettet sind. Hieraus werden bevorzugt dünne Platten, Schalen und Rohre hergestellt, bei denen die durch den Verfahrensgang bedingte Orientierung der Fasern zu einer flächenhaft gerichteten Bewehrung durchaus erwünscht ist. Die Zugfestigkeit von Asbestzement ist etwa 5- bis 10mal so groß wie die von unbewehrtem Zement-Feinmörtel. Die Zugbruchdehnung ist allerdings begrenzt, weil Asbestzement keine nennenswerten plastischen Eigenschaften aufweist.

Größere, quasiplastische Verformungen weisen dagegen auf Zug (und auch Druck) beanspruchte Mörtel und Betone auf, denen einige Volumenprozent kurze Fasern aus Stahl oder alkaliwiderstandsfähigem Glas zugegeben werden. Die im Vergleich zu Asbest wesentlich dickeren Glas- oder Stahlfasern weisen allerdings meist nur Längen von 25 bis 40 mm auf, was für eine Kräfteinleitung nicht ausreicht. Sie werden daher im allgemeinen bei Zugbeanspruchung vor Erreichen ihrer Zugfestigkeit aus der Matrix herausgezogen. Dieser Vorgang bewirkt als quasiplastische Verformung einen hohen Energieverzehr, so daß mit solchen Fasern bewehrter Mörtel und Beton relativ zäh ist. Damit wird die Widerstandsfähigkeit gegen dynamische Beanspruchung, wie z. B. die Schlagfestigkeit, auf das Mehrfache gesteigert.

Formänderungen, Dichtigkeit und Beständigkeit des erhärteten Betons

7. Formänderungen

Ursachen für Formänderungen des erhärteten Betons sind vor allem äußere Kräfte und die dadurch bewirkten Spannungen (elastische und plastische Formänderungen), Austrocknen (Schwinden) und Temperaturänderungen (Temperaturdehnungen). Durch Frost und chemische Einwirkungen oder Reaktionen können außerdem unerwünschte Formänderungen (Treiben) hervorgerufen werden.

7.1. Elastische und plastische Formänderungen

Bei den durch Spannungen verursachten Formänderungen (Tafel 1) ist zu unterscheiden nach dem zeitlichen Auftreten der Formänderungen und der Art der Formänderungen. Die Formänderungen können sofort, d. h. synchron mit der Belastung, auftreten, oder sie können bei dauernd einwirkenden Spannungen verzögert, d. h. erst im Verlauf der Zeit, auftreten. Ferner ist zu unterscheiden zwischen elastischen Formänderungen, die bei Entlastung zurückgehen, also reversibel sind, und plastischen oder viskosen Formänderungen, die auch nach einer Entlastung bleiben, also irreversibel sind. Bei Beton sind alle vier Kombinationen zwischen Zeitpunkt des Auftretens und Art der Formänderungen möglich. Allerdings sind nur die sofortige elastische Formänderung und die verzögert plastische Formänderung relativ groß, während die sofortige plastische Formänderung vernachlässigbar klein ist.

Tafel 1 Durch Spannungen verursachte Formänderungen von Beton

		Auftreten der Formänderung	
		sofort (synchron)	verzögert
Art der Formänderung	elastisch	als sofortige elastische Formänderung	als verzögerte elastische Formänderung
	plastisch (viskos)	als sofortige plastische Formänderung	als verzögerte plastische Formänderung

Meßtechnisch wird die gesamte elastische und plastische Formänderung unter konstanter Dauerlast in sogenannten Kriechständen bis zum Abklingen der verzögerten Formänderungen gemessen, was im allgemeinen Jahre dauert. An gesonderten Probekörpern gleicher Form, Zusammensetzung und Vorlagerung wird zum Zeitpunkt des Beginns der Dauerbelastung die sofortige ela-

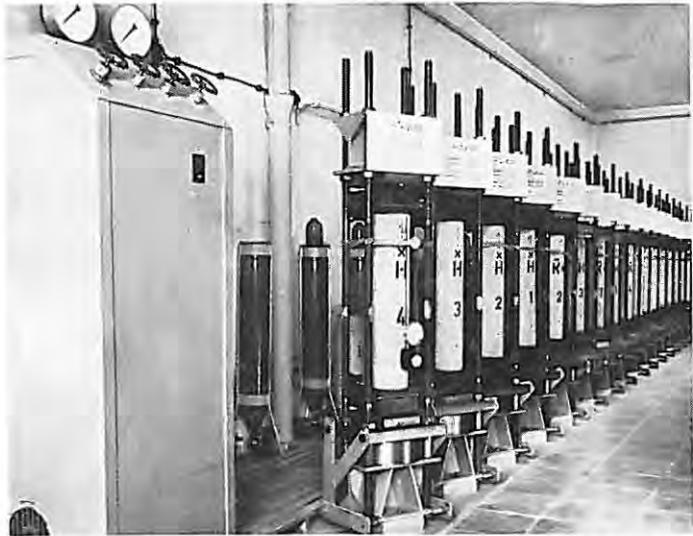


Bild 17 Kriechstände (Bauart MPA München) mit Betonzylindern 15/60 cm

stische Formänderung in Anlehnung an DIN 1048 Bl. 3 (Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls) ermittelt. Außerdem wird an unbelasteten Probekörpern gleicher Form, Zusammensetzung und Lagerung die während der Belastung auftretende Schwindverkürzung infolge Austrocknens ermittelt. Wenn man von der in den Kriechständen gemessenen Gesamtverformung die sofortige elastische Formänderung und die Schwindverkürzung abzieht, dann erhält man den Anteil der Gesamtverformung, der als Kriechen bezeichnet wird. Da die sofortige plastische Formänderung vernachlässigbar klein ist, stellt das Kriechen praktisch diejenigen Formänderungen dar, die unter Dauerlast im Verlauf der Zeit (verzögert) auftreten. Eine Aufteilung des Kriechens in die verzögert elastische und die verzögert plastische Formänderung ist meßtechnisch dadurch möglich, daß man nach Abschluß des Kriechvorgangs unmittelbar im Anschluß an die Entlastung das sogenannte Rückkriechen ermittelt, das der verzögert elastischen Formänderung entspricht.

Der statische Elastizitätsmodul des Betons wird nach DIN 1048 Bl. 3 nach 10maliger Be- und Entlastung bis zu $\frac{1}{3}$ seiner Bruchlast als Sekantenmodul bestimmt. Die dabei unterstellte Linearität zwischen Spannung und elastischer Verformung (Hookesches Gesetz) trifft nur in Annäherung zu. Der E-Modul des Betons hängt von zahlreichen Einflußgrößen ab, so unter anderem von der Betondruckfestigkeit, von Art und Anteil des groben Zuschlags, von der Zementleimmenge u. a. m. Die in DIN 1045, Tabelle 11, angegebenen Rechenwerte des E-Moduls von Beton berücksichtigen nur seine Druckfestigkeit; sie stellen Mittelwerte für die jeweiligen Betonfestigkeitsklassen dar, jedoch können die im Einzelfall vorliegenden E-Moduln bis zu 30% oder sogar noch mehr davon abweichen.

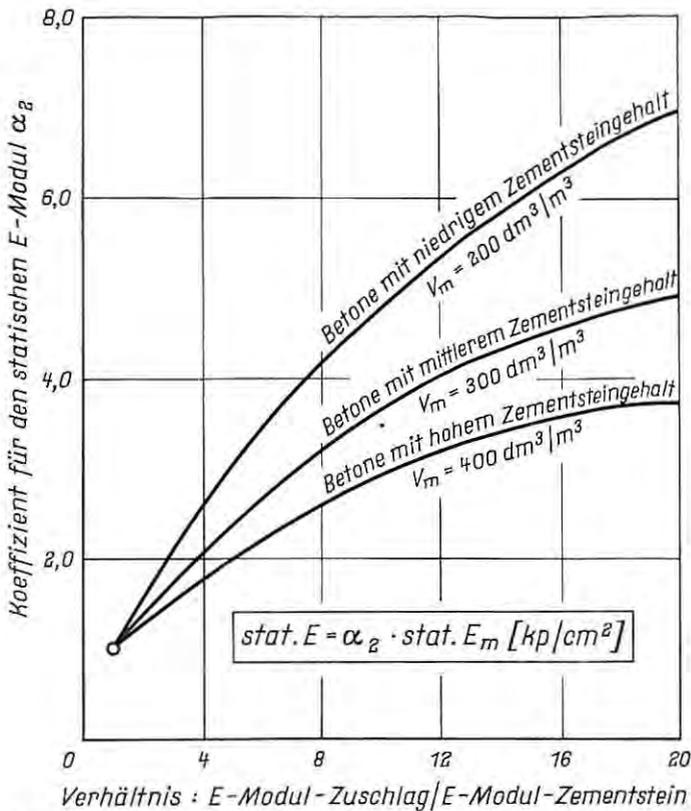


Bild 18 Diagramm zur Bestimmung des statischen E-Moduls von wasser-saltem Beton im Alter von 28 Tagen („stat. E_m “ = statisch bestimmter E-Modul von wasser-saltem Zementstein im Alter von 28 Tagen)

Das Kriechen des Betons (verzögert auftretende Formänderung bei Dauerlast) ist um so größer, je zementleimreicher der Beton ist, je früher er belastet wird und je trockener die Umweltbedingungen sind. Dünne Bauteile kriechen schneller und mehr als massige Bauteile. Bei höheren Temperaturen nimmt das Kriechen deutlich zu. Um das Kriechen rechnerisch einfacher berücksichtigen zu können, wird es gewöhnlich auf die sofortige elastische Formänderung (E-Modul) bezogen; dadurch ergibt sich die Kriechzahl φ , die angibt, wievielfach das Kriechen größer ist. Das Kriechen kann etwa 1- bis 6mal so groß sein wie die sofortige elastische Formänderung.

Wie bereits dargelegt, kann man das Kriechen in die verzögert elastische und die verzögert plastische Formänderung aufteilen. Die verzögert elastische Formänderung ist annähernd proportional der sofortigen elastischen Formänderung, was zu einer für diesen Anteil praktisch konstanten Kriechzahl von 0,3 bis 0,4 führt. Sie ist im allgemeinen auch deutlich kleiner als die verzögert plastische Formänderung (etwa 10 bis 30 %).

7.2. Schwinden und Schrumpfen

Unter Schwinden versteht man die äußere Volumenverminderung von festem Beton durch Austrocknen des nichtgebundenen Wassers in den Poren des Betons. Ein erheblicher Teil dieser Volumenverminderung ist reversibel. Die physikalischen Vorgänge beim Schwinden von Beton sind noch nicht abschließend geklärt, wengleich es hierfür mehrere Hypothesen gibt, von denen die der inneren Druckspannung infolge von Kapillarzugkräften am bekanntesten ist. Im Beton schwindet im wesentlichen nur der Zementstein, die Zuschlagkörner behindern das Schwinden des Zementsteins. Daher schwindet bei gleichem Wasserzementwert ein zementleimreicher (weicher) Beton stärker als zementleimärmer (steifer) Beton. Mit steigendem Wasserzementwert steigt infolge der erhöhten Kapillarporosität das Schwinden an. Unter sonst gleichen Bedingungen ist der Einfluß des Zements auf das Schwinden verhältnismäßig klein.

Das Austrocknen des Betons ist ein Diffusionsprozeß, so daß die Randzonen schon ausgetrocknet sein können, wenn der Kern noch feucht ist. Über den Querschnitt eines Betonkörpers bzw. -bauteils tritt daher ungleiches Schwinden auf, was zu Eigenspannungen führt, und zwar zu Schwind-Zugspannungen in der Randzone, die bei ungünstigen Verhältnissen zu Schwindrissen führen können. Da die Schwindspannungen zudem durch Kriechen in einem bislang nicht ausreichend erfaßbaren Maße abgebaut werden, ist es nicht ohne weiteres möglich, von einem im Laboratorium an kleinen Proben festgestellten Schwindmaß unter Einbeziehung des E-Moduls auf die Größe der Schwindspannungen oder gar auf die Sicherheit gegen Schwindrisse zu schließen. Ein indirekter Aufschluß kann dagegen z. B. durch Ermittlung des Abfalls der Biegezugfestigkeit austrocknender Betonbalken erhalten werden. Nachteilige Auswirkungen des Schwindens lassen sich vermeiden, wenn der Beton nur langsam austrocknen kann, z. B. durch Aufsprühen eines Nachbehandlungsfilms, weil dann der Austrocknungsgradient klein bleibt und weil sich dann ein länger andauerndes Kriechen günstig auswirkt. Das Schwinden von Leichtbeton ist meist etwas größer, weil die porigen Leichtzuschläge einen geringeren Verformungswiderstand aufweisen als dichte Zuschläge.

Für die rechnerische Berücksichtigung des Schwindens in Betonkonstruktionen enthalten die Normen und Richtlinien Angaben für das in Abhängigkeit von der Zeit auftretende Schwinden, bei denen die Umweltbedingungen, der Zementleimgehalt und die Bauteildicke zu berücksichtigen sind.

Äußere Volumenverminderungen des noch nicht formfest erstarrten Betons werden manchmal unter dem Begriff Schrumpfen zusammengefaßt. Ursachen können Sedimentation (Wasserabsondern), Verdunsten von Anmachwasser und auch die mit der Hydratation des Zements verbundene Volumenverminderung (auch „inneres“ oder „chemisches“ Schrumpfen genannt) sein. In der Erstarrungsphase ist der Beton gegen solche Formänderungen empfindlich, so daß dann sogenannte Schrumpfrisse auftreten können. Ursache solcher Risse sind ein scharfes Austrocknen von wasserreich angemachtem Beton, Behinderung des Schrumpfens durch Beweh-

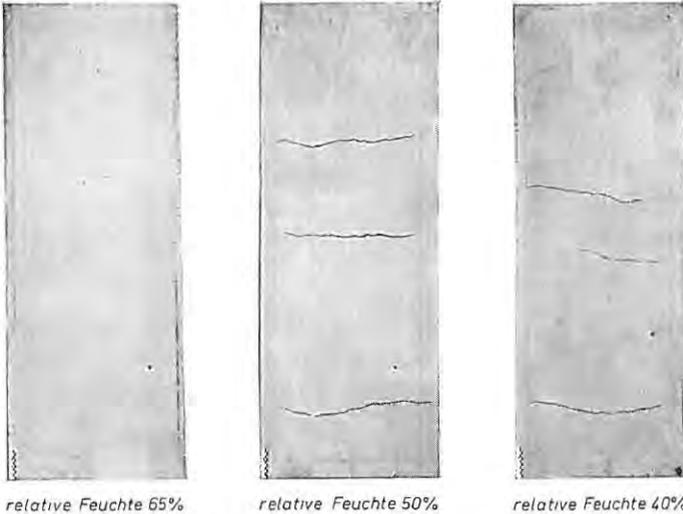


Bild 19 Untersuchung über das Entstehen sogenannter Schrumpfrisse in 160 cm langen Platten im Windkanal; Windgeschwindigkeit 5 m/s. Risse traten nur bei scharfen Austrocknungsbedingungen – relative Luftfeuchtigkeit unter 65 % – auf.

rungsstäbe, Verformung der Schalung und plötzliches Abkühlen der Betonoberfläche. Schrumpfrisse können vermieden oder wieder geschlossen werden, wenn der noch nicht erstarrte Beton nachverdichtet wird.

7.3. Temperaturdehnungen

Wie nahezu alle Stoffe dehnt sich Beton bei Temperaturerhöhung aus und zieht sich bei Temperaturniedrigung zusammen. Die Wärmedehnzahl des Betons wird dabei in erster Linie von der Dehnzahl des Zuschlags bestimmt, da er 70 Vol.-% oder mehr des Betonvolumens ausmacht. Beton aus üblichem, vorwiegend quarzhaltigem Zuschlag weist eine Wärmedehnzahl von größenordnungsmäßig $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ auf, bei bestimmtem Kalksteinzuschlag kann sie nur halb so groß und bei Baryt als Zuschlag nahezu doppelt so groß sein. Die Wärmedehnzahl von reinem Zementstein hängt von seinem Feuchtigkeitsgehalt ab. Sie liegt bei trockenem und wassersattem Zementstein ebenfalls in der Größenordnung von $10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, ist jedoch bei einem Feuchtigkeitsgehalt entsprechend einer Luftfeuchtigkeit von 50 bis 60 % nahezu doppelt so groß.

Nach den Normen und Richtlinien darf bei der Berechnung von Betonbauwerken für Normalbeton stets ein $\alpha_t = 10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ angesetzt werden. Für Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge aus Blähton und Blähschiefer ist ein einheitlicher Wert von $8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ angemessen.

8. Dichtigkeit

Die Dichtigkeit des Betons ist für manche Bauaufgaben unmittelbar von Bedeutung, z. B. die Dichtigkeit von Flüssigkeitsbehältern; sie ist darüber hinaus ein wesentliches Kriterium für die Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Angriffen. Als Maß für die Dichtigkeit wird die Eindringtiefe von Wasser unter einem Druck bis 70 m Wassersäule bestimmt (Prüfung nach DIN 1048 Bl. 1). Auch wenn dieses Verfahren nach physikalischen Durchflußgesetzen kein definiertes Ergebnis liefert, so hat es sich doch für praktische Belange zur Beurteilung des Grades der Wasserdurchlässigkeit eines Betons als ausreichend und brauchbar erwiesen. Untersucht wurden damit vielerlei Einflußgrößen, wie Betonzusammensetzung und Wasserzementwert, Zementeigenschaften, Zusatzmittel und Zusatzstoffe, Alter, Nachbehandlung u. a. m.

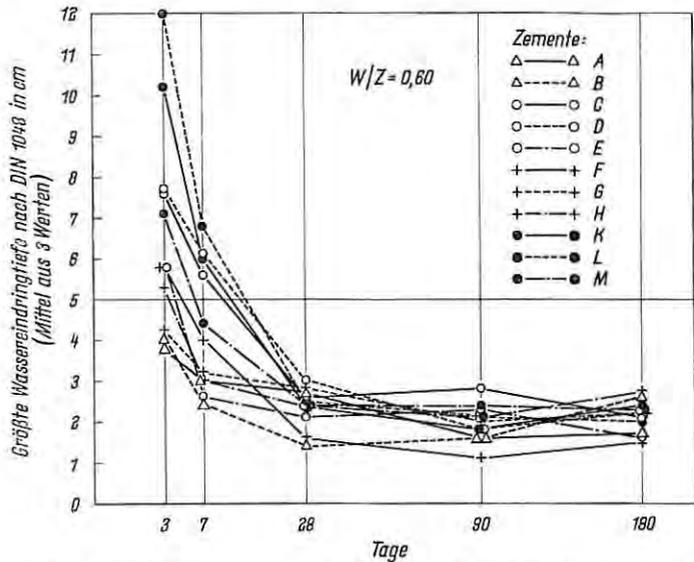


Bild 20 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus 3 Werten) bei Beton mit einem Wasserzementwert von 0,60 in Abhängigkeit von seinem Alter

Nach DIN 1045 gilt Beton für Bauteile bis zu 40 cm Dicke als „wasserundurchlässig“, wenn seine größte Eindringtiefe bei der Prüfung (DIN 1048; Mittel von drei Prüfkörpern) 5 cm nicht überschreitet. Hierbei darf der Wasserzementwert höchstens 0,60 betragen. Bei dickeren Bauteilen reicht für eine normgemäße „Wasserundurchlässigkeit“ ein Wasserzementwert von 0,70 aus. Starker chemischer Angriff setzt für einen ausreichenden Widerstand eine größere Dichtigkeit voraus, z. B. eine maximale Eindringtiefe von nur 3 cm. Bei zweckmäßiger Zusammensetzung entspricht auch Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge den normgemäßen Anforderungen an wasserundurchlässigen Beton.

Die Durchlässigkeit gegen Druckluft war nach Versuchen mit Normalbeton von seiner Zusammensetzung, jedoch noch wesentlich stärker von seinem Feuchtigkeitsgehalt abhängig. Mäßig feuchter

Beton (7 Tage unter feuchten Tüchern und 7 Tage an Luft) mit Zementgehalten und Wasserzementwerten wie etwa für einen Beton der Festigkeitsklasse Bn 350 erwies sich bis zu einem Druck von 5 kp/cm^2 als luftundurchlässig. Bei stärkerem Austrocknen wurde er jedoch gegenüber Druckluft zunehmend durchlässiger. Andererseits war weniger günstig zusammengesetzter Beton bei starker Durchfeuchtung ebenfalls luftundurchlässig.

Wie insbesondere ausländische Versuche gezeigt haben, weisen Betone, deren Poren durch polymerisiertes Kunstharz ausgefüllt sind (Polymerbeton), eine hohe Dichtigkeit und Festigkeit auf. Das Polymerisationsverfahren ist verhältnismäßig kostspielig, auch wenn nur eine Randzone imprägniert wird, so daß es vermutlich nur in besonderen Fällen Anwendung finden wird, möglicherweise bei Beton für Meerwasser-Entsalzungsanlagen. Betonflächen können außerdem mechanischen Einwirkungen ausgesetzt sein.

9. Beständigkeit

Zusätzlich zu den Beanspruchungen aus Eigen- und Verkehrslasten erfahren insbesondere Betonbauwerke im Freien von den Umweltbedingungen her zahlreiche Beanspruchungen, die physikalischer und/oder chemischer Natur sein können. Hierzu zählen wechselnde Temperaturen, Feuchtigkeitswechsel, Frost, chemisch angreifende Gase und Flüssigkeiten u. a. m. Diesen Beanspruchungen muß Beton über Jahrzehnte widerstehen.

9.1. Witterungs- und Frostbeständigkeit

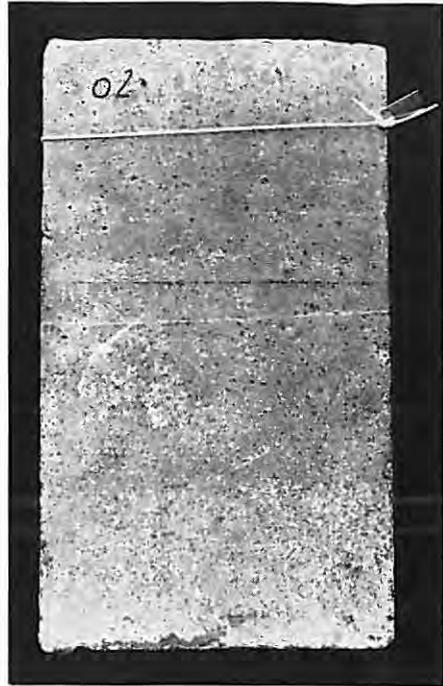
Neben Laborversuchen, bei denen meist nur eine Beanspruchungsart untersucht wurde, haben Langzeit-Witterungs-Versuche an Betonplatten sehr unterschiedlicher Zusammensetzung Auskunft über ihr Verhalten unter verschiedenen, zum Teil harten Bedingungen gegeben. Die Platten wurden im unteren Teil durch fließendes Wasser und darüber durch schroffe Temperaturwechsel sowie häufige Frost-Tau-Wechsel beansprucht. Bei Beton mit rd. 300 kg/m^3 Zement und einem Wasserzementwert zwischen 0,60 und 0,70 witterte im luftgelagerten Teil in 3 Jahrzehnten nur die Zementhaut etwas ab, und in schnell strömendem, weichem, schwach saurem Wasser wurde lediglich eine wenige mm dicke Feinmörtelschicht abgetragen.

Auf die Problematik der Übertragbarkeit von Frostprüfverfahren im Labor auf die Praxis ist bereits in Abschnitt 3.2.1 hingewiesen. Dennoch gestatten solche Untersuchungen, die in den letzten Jahren in großem Umfang durchgeführt wurden, graduelle Beurteilungen der verschiedenen Einflußgrößen auf den Frostwiderstand von Beton, wie sie für eine wissenschaftliche Durchdringung unerläßlich sind. Auch zwingt die Verwendung von Zuschlag mit „mäßigem Frostwiderstand“ zu Untersuchungen, unter welchen Bedingungen dieser verwendet werden kann.

Als gesichertes Erkenntnis konnte bereits in der Anfang der siebziger Jahre herausgegebenen Fassung der DIN 1045 festgelegt werden, daß Beton im durchfeuchteten Zustand gegen häufige und schroffe Frost-Tau-Wechsel zumindest immer dann einen aus-

Bild 21

Betonplatte nach rd.
30jähriger Witterungs-
einwirkung im Wärme-
dämmgebiet III
DIN 4108. — Die Platte
70 cm · 40 cm · 15 cm
stand mit einer Neigung
von rd. 60° mit der
vorderen Fläche nach
Süden gerichtet an
einer Bachböschung mit
ihrer unteren Hälfte in
fließendem Wasser.
(Beton 0/30 mm ohne
künstlich eingeführte
Luftporen mit 299 kg
Zement/m³, Konsistenz
K 3 und Wasserzement-
wert 0,67)



reichend hohen Widerstand besitzt, wenn sein Zuschlag frost-
beständig ist und der Beton die Anforderungen an einen „wasser-
undurchlässigen Beton“ (siehe Abschnitt 8) erfüllt. Der sonst auf
0,60 begrenzte Wasserzementwert darf bei massigen Bauteilen auf
0,70 erhöht werden, wenn durch luftporenbildende Zusatzmittel ein
angemessener Gehalt an Mikroporen eingeführt wird.

Der sehr günstige Einfluß dieser Mikroporen auf den Frostwider-
stand von Beton ist bereits vor Jahrzehnten entdeckt und durch
Versuche bestätigt worden. Im letzten Jahrzehnt sind die dafür
maßgebenden Kriterien sowie die Prüfverfahren am frischen und
erhärteten Beton wesentlich verfeinert und weiterentwickelt worden.

Beton, der auf Straßen, Brückenaufbauten und Randbefestigungen
mit Tausalzen in Berührung kommt, muß auch bei kleinerem Was-
serzementwert immer mit solchen Mikroluftporen in ausreichender
Menge hergestellt werden, da in erster Linie nur dadurch ein aus-
reichender Frost-Tausalz-Widerstand zu gewährleisten ist. Die
Schwierigkeiten, in erdfeuchten Beton (z. B. für Gehwegplatten)
eine ausreichende Menge Mikroluftporen einzuführen, konnten bei
Versuchen mehr oder weniger überwunden werden. Für den Tau-
salz-Widerstand solcher Betonwaren bleiben dennoch in erster Linie
die Betonzusammensetzung, Verdichtung und Nachbehandlung be-
stimmend.

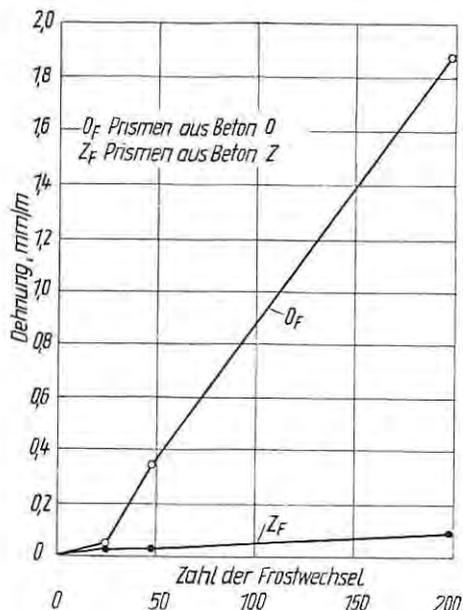


Bild 22

Dehnung von aufgetauten Betonprismen 55 cm · 10 cm · 10 cm ohne (O_F) und mit 3,1% Luftporen durch ein LP-Zusatzmittel (Z_F); Mittelwert von je 3 Prismen. Lediglich der Beton ohne künstliche Luftporen wies nach den 300 Wechseln zwischen Durchfrieren an der Luft in einem Frostraum und Auftauen in Wasser zahlreiche Netzrisse und ein Abwilttern der Kanten auf. (Beton 0/20 mm mit 299 kg Zement/m³, Konsistenz K 1, Wasserzementwert 0,60 bzw. 0,54.)

9.2. Chemischer Widerstand

Wässer, Böden und Gase können Stoffe enthalten, die Beton chemisch angreifen; dabei ist zwischen einem lösenden Angriff durch Säuren oder austauschfähige Salze und einem treibenden Angriff, wie z. B. durch Schwefelverbindungen, zu unterscheiden. Mit den im Laboratorium und in der Praxis an ausgelagerten Proben oder an Bauwerken gewonnenen Erkenntnissen konnten Richtwerte für die Beurteilung des Angriffsvermögens der häufigsten chemischen Agenzien sowie die Bedingungen für wirkungsvolle Gegenmaßnahmen aufgestellt werden (DIN 4030 und DIN 1045). Die zugrundeliegenden Untersuchungen befaßten sich im einzelnen z. B. mit der Einwirkung von Sulfatverbindungen, Magnesium- und Ammoniumsalzen, mit der von freien anorganischen und organischen Säuren sowie mit der Einwirkung von Ölen und Fetten. In Abhängigkeit vom angreifenden Medium und dessen Konzentration kann man die Intensität des chemischen Angriffs in schwach, stark und sehr stark unterteilen. Hierauf sind die betontechnischen Maßnahmen abzustimmen. Unter sonst gleichen Verhältnissen erwies sich für die Widerstandsfähigkeit des Betons seine Dichtigkeit als vorrangig, d. h. die nach DIN 1048 geprüfte Wasser-Eindringtiefe bzw. der für eine bestimmte Dichtigkeit höchstzulässige Wasserzementwert. Daneben erlangte je nach Menge und chemischer Beschaffenheit der angreifenden Substanz auch die Zementart eine gewisse Bedeutung.

So darf z. B. Beton, der stark sulfathaltigem Wasser ausgesetzt ist, keine größere Eindringtiefe als 3 cm und demzufolge keinen größeren Wasserzementwert als 0,50 aufweisen, und er muß außer-

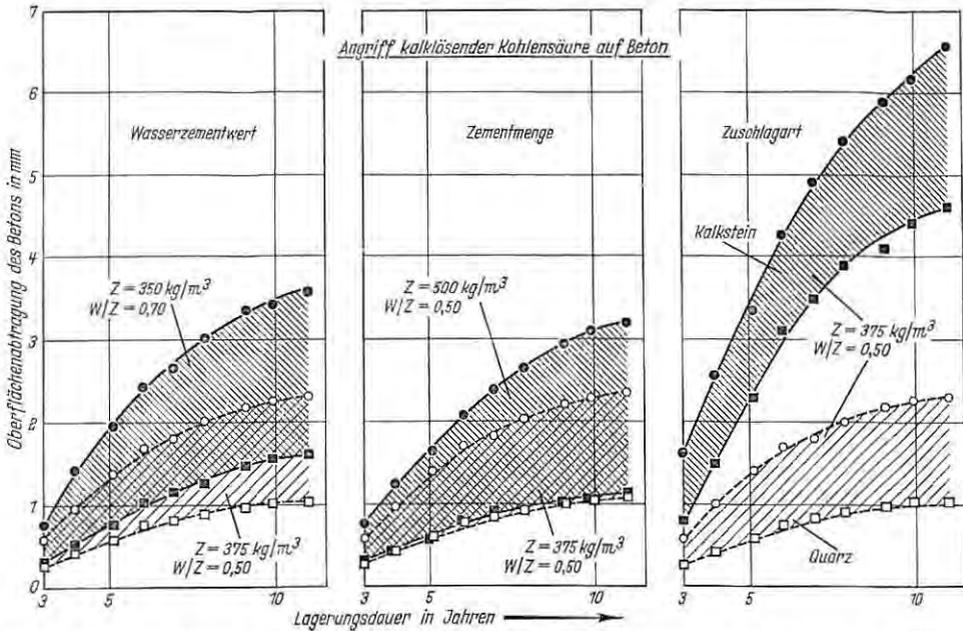


Bild 23 Dicke der Abtragung bei Prismen 4 cm · 4 cm · 16 cm aus Feinbeton nach Lagerung in bewegtem, „sehr stark“ angreifendem Wasser mit kalklösender Kohlensäure

dem mit Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement) hergestellt werden. Dem Angriff von Meerwasser an unseren Küsten widersteht ein solcher, dichter Beton über Jahrzehnte ohne merkbare Veränderung auch ohne Verwendung eines besonderen Zements, ebenso auch dem Angriff von Wässern mit hohem Gehalt an kalklösender Kohlensäure. Wenn in früheren Jahren häufiger und z. T. erhebliche Schäden an Bauwerken durch Sulfat- und Kohlensäureangriff entstanden, so dürfte dies vor allem auf zu hohen Wasserzementwert und unzureichende Dichtigkeit des hergestellten Betons zurückzuführen sein.

Nach neueren Versuchen veränderte die Einwirkung von Wasser mit hohem Sulfat- bzw. Kohlensäuregehalt auf frischen Beton seine Widerstandsfähigkeit im erhärteten Zustand nicht.

Durch die Einwirkung der Luftkohlensäure „carbonatisiert“ der Beton, und die sonst durch die hohe Alkalität des Betons auf Bewehrungsstahl gebildete Passivschicht, die den Stahl vor Korrosion schützt, geht verloren. Umfangreiche Langzeitversuche haben ergeben, daß die Carbonatisierungsgeschwindigkeit bei gleichen Umweltbedingungen in erster Linie von der Dichtigkeit des Betons, also von seinem Wasserzementwert, abhängt. Andererseits kann die korrosionsschützende Passivschicht auf dem Stahl von Chloridionen durchdrungen werden, so daß der Chloridgehalt im Beton gewisse Grenzwerte nicht übersteigen darf. Um festzustellen,

wie weit bei Schadensfällen, wie z. B. PVC-Bränden, der kritische Chloridgehalt in den Beton eingedrungen ist, wurde ein Indikationsverfahren entwickelt.

9.3. Widerstand gegen physikalische Einwirkungen

Je nach Verwendungszweck oder bei Schadensfällen kann Beton sehr hohen oder sehr niedrigen Temperaturen ausgesetzt werden. Über die Auswirkung hoher Temperaturen auf die Gebrauchseigenschaften von Mörtel und Beton, wie z. B. Druckfestigkeit, Formänderungen und Gefüge, sind im Laboratorium zahlreiche Untersuchungen angestellt worden. Im großen und ganzen wurde dabei festgestellt, daß sich bis zu Temperaturen von 250 °C die Gebrauchseigenschaften nur relativ wenig änderten, wenn keine häufigen Temperaturwechsel und nur eine langsame Erwärmung stattfanden und wenn der Beton hinsichtlich dieser Beanspruchungsart günstig zusammengesetzt war.

Viele Untersuchungen befaßten sich mit dem Verhalten des Betons bei Temperaturen von über 1000 °C, wie sie bei Bränden auftreten. Hierbei ging es vor allem darum, Maßnahmen zu erkunden, mit denen die Temperatur in der Bewehrung möglichst lange klein gehalten, ein Abplatzen der Betondeckung verhindert und so die Tragfähigkeit möglichst lange erhalten werden kann. Von Einfluß waren die durch den Betonaufbau bedingten wärmephysikalischen Größen, die davon abhängigen Eigen- und Zwängspannungen, vor allem aber die Wasserdampfbildung im Beton. Feststellungen über die Erwärmungsvorgänge sollen als Grundlage dienen, um in einer Synthese das Verhalten verschieden gestalteter Betonbauteile im Brandfall rechnerisch beurteilen zu können.

Im Zusammenhang mit der Lagerung von Flüssiggas kann Beton langsam oder schockartig Temperaturen weit unter - 100 °C ausgesetzt werden. Ausreichend erhärteter Beton widersteht selbst im wassersatten Zustand solcher Tieftemperatur-Schockbehandlung ohne Schädigung. Die wesentlichsten Gebrauchseigenschaften sind bei Beton mit so niedrigen Temperaturen eher noch günstiger als ungünstiger.

In Anlagen der Nukleartechnik wird Beton zur Abschirmung verwendet und dabei hohen Dosen von γ - und Neutronenstrahlen ausgesetzt. Den vorkommenden Beanspruchungen widersteht der Beton ohne praktisch bedeutsame Veränderung über Jahrzehnte.

Der Widerstand gegen mechanische Einwirkungen ist z. B. für befahrene Böden und Beläge von Werkshallen von Bedeutung. Bei den diesbezüglichen Prüfverfahren wird der Beton einer schleifenden Beanspruchung oder einer Beanspruchung durch rollende Kugeln ausgesetzt. Dabei ergab sich die geringste Abnutzung, wenn der Beton mit hoher Festigkeit (niedrigem Wasserzementwert), möglichst kleinem Mehlkorngelalt und grobem Zuschlaggemisch sowie mit Zuschlag aus harten Gesteinskörnern mit mäßig rauher Oberfläche und gedrungener Gestalt hergestellt wurde. Die gleichen Bedingungen fanden sich auch für Beton, der einen hohen Widerstand gegen Erosion und Kavitation durch rasch fließendes Wasser oder durch einen Druckwasserstrahl aufweisen muß.

10. Schlußbemerkung

Durch die auf dem Gebiet der Betontechnologie gewonnenen Erkenntnisse kann heute ein in den verschiedensten Eigenschaften zuverlässig beherrschbarer Beton hergestellt werden. Sein Verhalten gegenüber vielerlei Beanspruchung ist weitgehend bekannt. Diese Kenntnis wird zur Errichtung sicherer und beständiger Bauwerke, die praktisch keiner Unterhaltung bedürfen, genutzt.