

# 9 Herstellung und Verarbeitung

## 9.1 Herstellen des Betons

Frischbeton wird heute fast ausschließlich in Transportbetonwerken, auf Großbaustellen oder in Fertigteilwerken in mittleren und großen Mischanlagen hergestellt. Grundlegende Bedingungen für die *Herstellung* enthält DIN EN 206-1/DIN 1045-2.

Für den herzustellenden Beton muss am Ort der Dosierung eine dokumentierte Mischanweisung vorhanden sein, die Einzelheiten über Art und Menge der Ausgangsstoffe enthält. Die Genauigkeit beim Dosieren der Ausgangsstoffe soll für alle Betonmengen über  $1 \text{ m}^3$  jeweils  $\pm 3 \%$  der erforderlichen Menge betragen. Zemente, Gesteinskörnung und pulverförmige Zusatzstoffe müssen nach Masse dosiert werden. Andere Verfahren sind zulässig, falls die geforderte Dosiergenauigkeit erreicht werden kann. Zugabewasser, leichte Gesteinskörnung, Zusatzmittel und flüssige Zusatzstoffe dürfen nach Masse oder Volumen dosiert werden, wobei bei Einsatz von leichter Gesteinskörnung die volumetrische Abmessung zu bevorzugen ist.

In der Regel erfolgt die *Dosierung* der Ausgangsstoffe computergesteuert. Wenn die Eigenschaften der Ausgangsstoffe nicht konstant sind, müssen während des Programmablaufs ermittelte Messwerte in Korrekturen umgesetzt werden. Eine maßgebliche Rolle spielt dabei die Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung. Diese muss zur Bestimmung des Zugabewassers kontinuierlich überprüft werden. Da die Oberflächenfeuchte der groben Gesteinskörnung gering ist, genügt meistens die Bestimmung der Sandfeuchte. Dazu werden Messgeräte benutzt, die die Feuchte

durch die elektrische Leitfähigkeit, die Dielektrizitätskonstante, die elektrische Kapazität oder die Neutronenabsorption bestimmen. Zusammen mit der Bestimmung der Feuchte des Sands können über das Messen verschiedener Frischbetoneigenschaften im Mischer, z. B. des Leistungsbedarfs am Mischerantrieb, Schwankungen in der Kornzusammensetzung und Feuchte der Gesteinskörnung ermittelt und mittels Computersteuerung durch die Wasser- oder Sandzugabe automatisch berücksichtigt werden.

Während des Mischvorgangs muss eine vollständige Durchmischung und eine gleichmäßige Verteilung der Betonkomponenten erreicht werden.

Das *Mischen* der Ausgangsstoffe muss nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 in einem mechanischen *Mischer* erfolgen und so lange dauern, bis die Mischung gleichförmig erscheint. Die Herstellung von Beton mittels Handmischung ist nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 nicht mehr erlaubt. Im Allgemeinen gilt Leichtbeton bei einer Mindestmischzeit von 90 s, Normalbeton bei einer Mindestmischzeit von 30 s als gleichmäßig durchmischt. Generell ist zu beachten, dass die Mischer nicht über ihr angegebenes Fassungsvermögen hinaus beschickt werden.

Die Maschinenmischung erfolgt chargenweise in Trommel-, Teller- oder Trogmischern oder kontinuierlich in Durchlaufmischern [Son1]. Trommelmischer sind für steife und sehr zementreiche Mischungen weniger geeignet.

Zusatzmittel müssen – mit Ausnahme von Fließmitteln – während des Hauptmischgangs zugegeben werden. Wenn Fließmittel nach dem Hauptmischgang zugegeben werden, muss der Beton so lange weiter gemischt werden, bis sich das Zusatzmittel vollständig in der Mischung verteilt hat und voll wirksam ist. In einem Fahrmixer muss die Mischdauer nach Zugabe eines Zusatzmittels mindestens  $1 \text{ min/m}^3$  betragen und darf nicht kürzer als fünf Minuten sein.

Eine Sonderform des Mischens stellt das so genannte *Dampfmischen* dar. Beim Dampfmischen wird der Beton während des Mischvorgangs durch gesteuerte Zufuhr von gesättigtem Wasserdampf, der mit zum Wassergehalt des Frischbetons beiträgt, auf eine Temperatur von häufig über 30 °C erwärmt (s. Abschnitt II.11). Dadurch kann die Betonerhärtung beschleunigt werden. Die Anwendung setzt jedoch umfangreiche Erfahrungen und ausreichende Eignungsprüfungen voraus. Ein Merkblatt für die Anwendung des Betonmischens mit Dampfführung wurde vom VDZ [Me2] herausgegeben.

Im Hinblick auf die Konformität mit den definierten Festlegungen und Anforderungen der entsprechenden Normen müssen die Ausgangsstoffe, die Ausrüstung, die Herstellung und der Beton überwacht werden. Die Produktionskontrolle muss so angelegt sein, dass wesentliche Änderungen, die die Eigenschaften beeinflussen, aufgedeckt und angemessene Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Entsprechende Anforderungen an die Produktionskontrolle sind in DIN EN 206-1/DIN 1045-2 niedergelegt.

Nach dem Ort der Herstellung des Betons wird in *Transportbeton* und *Baustellenbeton* unterschieden.

Heute wird mehr als die Hälfte des gesamten deutschen Zementversands in Transportbetonwerken verwendet und etwa 85 % des auf Baustellen eingebauten Ortbetons als Transportbeton geliefert. Die besondere Wirtschaftlichkeit dieses Herstellverfahrens beruht auf den mit hohem Geräteeinsatz verbundenen geringen Lohnkosten. Zudem können die Möglichkeiten der Betontechnologie in einer werkmäßigen Herstellung voll ausgenutzt werden [Wes1]. Da die Verantwortung für die Eigenschaften des Endprodukts Festbeton nicht mehr in einer Hand liegen, sondern für die Herstellung bis zur Übergabe beim Transportbetonwerk und für die Verarbeitung beim ausführenden Bauunternehmen, bedarf diese Schnittstelle einer ausreichenden

Absicherung durch Identitäts-, Abnahme- oder Kontrollprüfungen (s. Abschnitt II.17).

Neben dem Transportbeton und dem Baustellenbeton gibt es noch den so genannten *Trockenbeton*. Trockenbeton ist ein trockenes Gemisch, das aus Zement, trockenen Gesteinskörnungen und gegebenenfalls Zusätzen werkmäßig hergestellt wird, lagerungsfähig verpackt ist und nach dem Vermischen mit einer angegebenen Wassermenge einen Beton nach DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 ergibt. Trockenbeton muss der Trockenbeton-Richtlinie [Ri8] entsprechen. In Spannbetonbauteilen darf Trockenbeton zum Schließen von Aussparungen und zum Ausbessern eingesetzt werden.

## 9.2 Befördern des Betons

Das *Befördern* des Transportbetons zur Baustelle geschieht in Deutschland überwiegend in Mischfahrzeugen oder in Muldenkippern. Letztere sind für das Befördern von Frischbeton steifer Konsistenz, z. B. im Betonstraßenbau, zugelassen. Frischbeton anderer als steifer Konsistenz darf gemäß DIN 1045-3 nur in Fahrmischern zur Verwendungsstelle befördert werden. Unmittelbar vor dem Entladen muss der Beton nochmals gemischt werden, sodass er auf der Baustelle gleichmäßig durchmischt übergeben wird.

Es hat sich als nachteilig erwiesen, Beton in Fahrzeugen mit Ladeflächen aus Leichtmetall zu befördern, da das durch den Abrieb in den Beton gelangte Aluminium in der alkalischen Porenlösung des Frischbetons Wasserstoffgas bildet. Die Gasentwicklung führt zu unerwünschten Treiberscheinungen im Frischbeton und zu festigkeitsmindernden Poren im Festbeton.

Während des Beförderns ist der Frischbeton vor schädlichen Witterungseinflüssen zu schützen. Dies gilt besonders für Frost,

aber auch für hohe Temperaturen im Sommer. Die Frischbetontemperaturen darf im Allgemeinen  $+30\text{ °C}$  nicht überschreiten, sofern nicht durch geeignete Maßnahmen sichergestellt ist, dass keine nachteiligen Folgen zu erwarten sind. Im Winter sollen die Betontemperaturen beim Einbringen  $+5\text{ °C}$  (bei Lufttemperaturen zwischen  $+5$  und  $-3\text{ °C}$ ) oder  $+10\text{ °C}$  (bei Lufttemperaturen unter  $-3\text{ °C}$ ) nicht unterschreiten. Bei Verwendung von Zementen mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung und wenn der Zementgehalt im Beton kleiner als  $240\text{ kg/m}^3$  ist, darf die Betontemperatur ebenfalls  $+10\text{ °C}$  nicht unterschreiten. Bei Gefahr der Frosteinwirkung auf den Frischbeton darf der Beton während der ersten Tage der Hydratation erst dann durchfrieren, wenn seine Temperatur vorher wenigstens drei Tage  $+10\text{ °C}$  nicht unterschritten hat oder wenn er bereits eine Druckfestigkeit von  $5\text{ N/mm}^2$  erreicht hat.

Fahrmischer sollten spätestens 90 Minuten, Fahrzeuge ohne Mischer oder Rührwerk für die Beförderung von Beton steifer Konsistenz spätestens 45 Minuten nach der ersten Wasserzugabe vollständig entladen sein.

Diese Zeiten sind noch zu kürzen, wenn beispielsweise infolge von Witterungseinflüssen mit einem beschleunigten Ansteifen des Betons gerechnet werden muss. Für Verarbeitungszeiten größer als drei Stunden gilt die DAfStb-Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton) [Ri3].

Um sicherzustellen, dass die vereinbarte Konsistenz bei der Übergabe des Betons tatsächlich vorhanden ist, muss bei der Betonherstellung ein Konsistenzvorhaltemaß berücksichtigt werden. Eine nachträgliche Wasserzugabe auf der Baustelle ist wegen der damit verbundenen Erhöhung des Wasserzementwerts und der Verminderung der Festigkeit und Dichtheit des erhärteten Betons nicht gestattet. Falls die Konsistenz bei *Lieferung des Betons* steifer als festgelegt und der Beton noch im Fahr-

mischer ist, darf die Konsistenz durch Zugabe von Fließmittel auf den festgelegten Wert gebracht werden, sofern die Unbedenklichkeit durch die Erstprüfung nachgewiesen wurde. Die Mengen des jeweils in den Fahrmischer zugegebenen Fließmittels müssen in jedem Fall auf dem Lieferschein vermerkt werden (s. u.).

Die Übergabe des Transportbetons auf der Baustelle erfolgt entweder direkt über Rutschen oder Rinnen zu den Baukörpern, in Aufnahmebehältern für die Weiterförderung (Pumpe, Kübel, Förderband usw.) oder in Zwischenbehälter.

Vor dem Entladen des Betons muss der Hersteller dem Verwender einen *Lieferschein* für jede Betonladung übergeben, auf dem nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 mindestens folgende Angaben gedruckt, gestempelt oder handschriftlich eingetragen sind:

- Name des Transportbetonwerks
- Lieferscheinnummer
- Datum und Zeit des Beladens; d. h. Zeitpunkt des ersten Kontakts zwischen Zement und Wasser
- Kennzeichen des LKW oder Identifikation des Fahrzeugs
- Name des Käufers
- Bezeichnung und Lage der Baustelle
- Einzelheiten oder Verweise auf die Festlegung, z. B. Nummer im Listenverzeichnis, Bestellnummer
- Menge des Betons in  $m^3$
- bauaufsichtliches Übereinstimmungszeichen unter Angabe von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2
- Name oder Zeichen der Zertifizierungsstelle, falls beteiligt
- Zeitpunkt des Eintreffens des Betons auf der Baustelle
- Zeitpunkt des Beginns des Entladens
- Zeitpunkt des Beendens des Entladens

Für Fließbeton sind bei Zugabe von Fließmittel auf der Baustelle handschriftlich auf dem Lieferschein einzutragen:

- Zeitpunkt der Zugabe
- zugegebene Menge an Fließmittel
- geschätzte Restmenge in der Mischtrommel vor der Zugabe

Zusätzlich muss der Lieferschein folgende Einzelheiten enthalten:

a) für Beton nach Eigenschaften

- Festigkeitsklasse
- Expositionsklasse(n)
- Festigkeitsentwicklung
- Art der Verwendung (unbewehrter Beton, Stahlbeton, Spannbeton) oder die Klasse des Chloridgehalts
- Konsistenzklasse oder Zielwert der Konsistenz
- Grenzwerte der Betonzusammensetzung, falls festgelegt
- Art und Festigkeitsklasse des Zements
- Art der Zusatzmittel und Zusatzstoffe, falls verwendet
- besondere Eigenschaften (z. B. Pumpbarkeit bei Leichtbeton), falls erforderlich
- Nennwert des Größtkorns der Gesteinskörnung
- Rohdichteklasse oder Zielwert der Rohdichte bei Leichtbeton oder Schwerbeton
- Festigkeitsentwicklung des Betons

b) für Beton nach Zusammensetzung

- Einzelheiten über die Zusammensetzung, z. B. Zementgehalt, und, falls erforderlich, Art des Zusatzmittels
- entweder Wasserzementwert oder Konsistenz durch Angabe der Klasse oder des Zielwerts, wie festgelegt
- Nennwert des Größtkorns der Gesteinskörnung

c) für Standardbeton

- Druckfestigkeitsklasse

- Expositionsklasse(n)
- Nennwert des Größtkorns der Gesteinskörnung
- Festigkeitsentwicklung, falls festgelegt
- Konsistenzbezeichnung

Für hochfesten Beton muss der Lieferschein alle Wägedaten einschließlich der Daten in a) oder b), automatisch aufgedruckt, enthalten. Nachträglich sind anzugeben:

- Feuchtegehalt der Gesteinskörnung
- Menge des auf der Baustelle dosierten Fließmittels
- Konsistenz unmittelbar vor und nach jeder Fließmittelzugabe an jedem Fahrmischer

### 9.3 Fördern des Betons

Das *Fördern* des Betons beginnt mit der Übergabe auf der Baustelle und endet an der jeweiligen Einbaustelle. Wesentlich ist, dass die Leistung der *Fördergeräte* auf der Baustelle mit den angelieferten Transportbetonmengen abgestimmt ist.

Für das Fördern des Betons vom Mischer oder Transportbetonfahrzeug zur Einbaustelle bieten sich je nach Baustellensituation, der Konsistenz des Frischbetons und der Weite des Förderwegs im Wesentlichen die nachfolgenden drei Förderarten an:

- Fördern in Gefäßen,
- Fördern in Rohrleitungen und
- Fördern auf Bändern.

Bei der Auswahl einer *Förderart* ist neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten darauf zu achten, dass sich der Frischbeton während des Förderns nicht entmischt.

Als Gefäße für das Fördern des Betons dienen beispielsweise fahrbare Behälter oder Schwebbahnen, letztere bei Großbaustellen oder in Betonwerken, ferner Kübel, die mit Kränen oder

Aufzügen vom Mischer zur Einbaustelle transportiert werden. Die Förderung in Gefäßen und Kübeln zeichnet sich dadurch aus, dass sie sich für alle Frischbetonkonsistenzen eignet.

Das Fördern des Frischbetons durch Rohrleitungen, insbesondere als *Pumpbeton*, hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Überwiegend werden hydraulisch angetriebene Kolbenpumpen eingesetzt. Für weichere Betonkonsistenzen sind auch Rotorschlauchpumpen gebräuchlich. Die Förderung von Spritzbeton wird in Abschnitt II.10.1 näher erläutert. Das Pumpen kann durch stationäre Anlagen oder durch bewegliche, auf Lkw montierte Pumpen erfolgen. Mit ausklappbaren Verteilermasten werden bis rund 60 m Weite oder Höhe direkt überbrückt. Es werden heute etwa 35 % des Transportbetons mit Pumpen gefördert.

Generell muss beachtet werden, dass für das Fördern des Betons durch Pumpen die Verwendung von Leichtmetallrohren nicht zulässig ist (Aluminiumabrieb, Gasentwicklung (s. Abschnitt II.9.2)).

Die Verbesserung der maschinellen Einrichtungen und die Weiterentwicklung der Technologie gestatten es heute, Beton über Weiten von mehr als 1000 m und Höhen von über 200 m auch ohne Staffeleinsatz, d. h. ohne das Einschalten von Zwischenstationen, zu pumpen.

Beim Verlegen der Rohrleitungen sollte beachtet werden, dass die Rohrleitungen nur unbedingt erforderliche Richtungsänderungen aufweisen; unnötige Bögen sind aufgrund des höheren Verformungswiderstands zu vermeiden. Alle Rohrkupplungen müssen bei höchstmöglichem Druck 100 % wasserdicht sein, weil sonst Verstopfer unvermeidbar sind. Es ist dringend zu empfehlen, dass bei fest verlegten Rohrleitungen zunächst über die größte Entfernung gepumpt wird. Im Verlaufe des Betoniervorgangs wird dann durch Abnehmen einzelner Rohre die Leitung verkürzt.

**Tafel II.9.3-1: Leistungsvergleich verschiedener Förderarten**

Förderart		Förderleistung in m <sup>3</sup> /h
Kübel	Kran	5 bis 15
	Kabelbahn	50 bis 100
Pumpe	Dichtstrom	40 bis 100
Spritzmaschine	Dünnstrom	2 bis 10
Förderband		20 bis 60
Rutsche		10 bis 60

Bei einer Hochförderung sollte die Rohrleitung senkrecht verlegt werden. Die Entfernung zwischen Betonpumpe und Steigleitung ist möglichst groß zu wählen, damit die Reibung des Betons in der waagerechten Leitung den Druck der Betonsäule aufnehmen kann. In der Praxis hat sich ein Verhältnis der Länge der Steigleitung zur unteren horizontalen Leitungslänge von etwa 2 : 1 als zweckmäßig herausgestellt.

In einer Abwärtsleitung darf die Betonsäule nicht abreißen. Um dies zu vermeiden, sind Widerstände in Form von Rohrkrümmern oder Schiebern einzubauen. Diese sind vor allem dann erforderlich, wenn sich an die Gefälleleitung keine längere horizontale Leitung anschließt.

Mit modernen Pumpen können bis zu rund 100 m<sup>3</sup> Beton pro Stunde durch eine Rohrleitung gefördert werden [Son2]. Das Pumpverfahren ist damit im Allgemeinen das leistungsfähigste Betonförderverfahren (s. **Tafel II.9.3-1**).

Beim Pumpen des Betons müssen Verstopfer möglichst vermieden werden. Pumpfähiger Beton darf nicht mehlkornarm sein.

Er muss ein gutes Wasserrückhaltevermögen besitzen und sollte eine weiche Konsistenz aufweisen.

Die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnungen soll im Sandbereich etwa der Sieblinie B entsprechen, d. h. an der oberen Begrenzung des günstigen Bereiches liegen. Die grobe Gesteinskörnung muss ausreichend von Feinmörtel umgeben sein, damit der auf den Frischbeton ausgeübte Druck vom Zementleim übertragen wird und nicht nur auf das Korngerüst wirkt.

Der Beton darf auch während einer Pump pause in der Rohrleitung keinesfalls zum Absetzen von Wasser neigen und sollte über die Betonierzeit hinweg möglichst gleichmäßig zusammengesetzt sein. Besonders Schwankungen im Wassergehalt, die die Konsistenz des Betons beeinflussen, können die Bildung von Verstopfern fördern.

Im Bergbau oder in tief liegende Baugruben kann man den Beton durch Fallrohrleitungen bis in Tiefen über 1000 m unter Ausnutzung der Schwerkraft [Dah3] fördern.

Neben den genannten Förderarten in Gefäßen und Rohrleitungen haben andere Förderarten, wie z. B. auf Förderbändern, eine vergleichsweise geringe Bedeutung. Für den Transport auf geneigten Förderbändern ist nur steifer bis plastischer Beton geeignet. Bandart, -steigung und -geschwindigkeit müssen auf die Konsistenz des zu fördernden Betons abgestimmt sein. An der Abwurfstelle besteht vor allem bei steifem Beton Entmischungsfahr. Deshalb sind dort Trichter oder Prallbleche anzuordnen.

## **9.4 Einbringen und Verdichten des Betons**

Beim Betonieren, insbesondere von kompliziert geformten oder stark bewehrten Bauteilen, ist darauf zu achten, dass sich der

Beton beim *Einbringen* nicht entmischt. Im Allgemeinen soll er daher beim Verlassen des Fördergefäßes oder des Pumprohres nicht mehr als 1 m frei fallen. Bei größeren Höhen sind Schüttrinnen oder Fallrohre anzuordnen.

Bauteile mit geneigter Grundfläche (Platten, Wände) sind stets vom Tiefpunkt aus zu betonieren, weil sonst der bereits verdichtete Beton abrutscht und wieder aufreißt. Beim Betonieren von Wänden ist das lagenweise Schütten und Verdichten des Betons üblich. Die Lagen bleiben jedoch oft sichtbar. Wenn man kontinuierlich, z. B. mit der Pumpe, betoniert und gleichzeitig den Beton mit Innenrüttlern verdichtet und ihn in der Böschung über kurze Strecken ohne Entmischung mit dem Rüttler treibt, kann man streifenfreien Sichtbeton erhalten.

Die Schalung ist so zu bemessen, dass die Baustelle in ihrer Betonierleistung nicht durch einen zu geringen aufnehmbaren Druck auf die Schalung behindert wird.

Der wichtigste Vorgang beim Einbau des Betons ist die vollständige Frischbetonverdichtung. Ohne eine vollständige *Verdichtung* kann der Beton nicht die im Mischungsentwurf zugrunde gelegten Festbetoneigenschaften erreichen, da bei allen beton-technologischen Regeln und Entwurfsgrundlagen eine vollständige Frischbetonverdichtung vorausgesetzt wird. Wenn die verschiedenen Verdichtungsmöglichkeiten auch sehr unterschiedlich sein können, so gilt doch allgemein die Forderung, dass die Konsistenz des Frischbetons und die gewählte *Verdichtungsart* so aufeinander abgestimmt sein müssen, dass unter den speziellen Bedingungen des Bauwerks bzw. des Produktionsvorganges eine ausreichende Verdichtung erreicht wird. Besonders sorgfältig ist die Verdichtung in den Ecken, längs der Schalung, in engen Bereichen, bei Einbauteilen, Fugenbändern und Bewehrungsanschlüssen auszuführen. So weit möglich empfiehlt sich ein *Nachverdichten* des Betons.

In Abhängigkeit von der Konsistenz des Betons werden die folgenden Verdichtungsarten angewendet:

steifer Beton: Oberflächenrüttler, Stampfer, Schalungsrüttler zum Teil zugleich unter Anwendung von Auflasten

plastischer Beton: Innenrüttler, Schalungsrüttler, Schocken

weicher Beton: Innenrüttler, Schalungsrüttler, Schalungsklopfer

Fließbeton: leichtes Rütteln, Stochern

Häufig wird das Rüttelverfahren angewendet, bei dem der Beton durch Schwingungen quasi verflüssigt wird, sodass die im Frischbeton vorhandene Luft weitgehend entweichen kann. Bei der Verdichtung von plastischem Beton durch Innenrüttler sollen die Rüttelflaschen schnell in den Beton eingeführt, aber langsam wieder herausgezogen werden. Auf diese Weise kann die Luft nach oben entweichen, und die Rüttelgasse wird geschlossen. Die Schichtdicken des Betons und die Abstände der Eintauchstellen sind auf die Größe und Wirksamkeit des Rüttlers abzustimmen. Die Rüttler sollen mit der Bewehrung oder der Schalung möglichst nicht in Berührung kommen. Wird keine Arbeitsfuge vorgesehen, so darf beim Einbau in Lagen das Betonieren nur so lange unterbrochen werden, bis die zuletzt eingebrachte Betonschicht noch nicht erstarrt ist, sodass noch eine gute und gleichmäßige Verbindung zwischen beiden Betonschichten möglich ist. Bei Verwendung von Innenrüttlern muss die Rüttelflasche noch in die untere, bereits verdichtete Schicht eindringen.

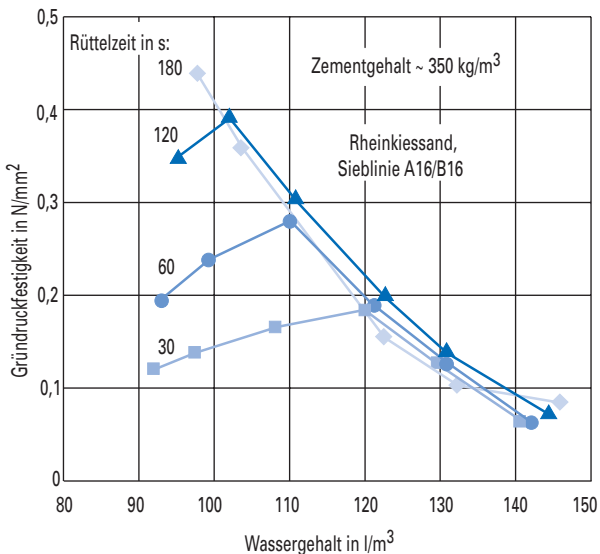
Das Nachverdichten des Betons ist eine zusätzliche Maßnahme zur weiteren Gütesteigerung. Je nach Erstarrungszeit kann es noch nach einer Stunde und später erfolgen, solange, wie der Beton noch verformbar ist. Durch das Nachrütteln werden Hohlräume, die sich durch Nachsacken des Frischbetons, z. B. unter

waagerechten Bewehrungsstäben oder Aussparungen gebildet haben, geschlossen. Insgesamt wird ein dichteres Betongefüge erreicht und das Risiko einer Rissbildung verringert. Zum Nachverdichten von senkrechten Bauteilen (Wände) eignen sich bei entsprechender Zugänglichkeit z. B. Schalungsklopfer, bei waagerechten Betonflächen kann das Nachverdichten durch Oberflächenrüttler oder durch Glättmaschinen (Propeller- oder Scheibenglätter) erfolgen. Durch diese Maßnahme lässt sich z. B. die Gefahr von Kapillar- bzw. Fröhschwindrissen vermindern.

Ausführliche Hinweise über die Verdichtung des Betons durch Rüttler, insbesondere auch für erschwerte Einbaubedingungen, finden sich in DIN 4235 sowie in [Wal8].

In Betonwerken werden häufig Schalungsrüttler/Außenrüttler angewendet, die die Schalung oder die ganze Form in Schwingungen versetzen. Dabei kann es vorkommen, dass sich die Stellen, an denen die Rüttler angeordnet waren, farblich an der Fertigteiloberfläche abzeichnen. Sofern dies störend ist, kann eine Abhilfe meist durch Änderung des Mischungsaufbaus, bessere Aussteifung und Dichtung der Schalung oder Änderung der Frequenz und Amplitude der Rüttler erreicht werden.

Bei erdfeuchten Betonen, wie sie für die Betonwarenherstellung typisch sind (s. Abschnitt II.11), ist die sonst übliche Abstimmung zwischen Konsistenz und Verdichtungsgerät sinngemäß auf eine Abstimmung zwischen Wassergehalt und zur Verfügung stehender Verdichtungsenergie zu übertragen. **Bild II.9.4-1** zeigt den durch Versuche ermittelten Zusammenhang zwischen der so genannten Gründruckfestigkeit (das ist die Festigkeit eines sofort nach der Verdichtung entformten, also nicht hydraulisch erhärteten Betonkörpers), dem Wassergehalt und der aufgewendeten Verdichtungsenergie. Für jede Verdichtungsenergie gibt es bei sonst gleicher Zusammensetzung des Betons einen



**Bild II.9.4-1: Gründruckfestigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Rüttelzeit und dem Wassergehalt [Wie3]**

Wassergehalt, bei dem die höchste *Gründruckfestigkeit* erreicht wird [Wie3]. Dieser Wassergehalt mit der höchsten zugeordneten Gründruckfestigkeit führt jedoch nicht automatisch zu einem optimal verdichteten Beton. Für wasserundurchlässige Betonwaren sind z. B. Wassergehalt und Verdichtungsenergie so abzustimmen [Wie1], dass die Produkte sowohl vollständig verdichtet und grünstandfest als auch im erhärteten Zustand wasserundurchlässig sind.

Auch für die Verarbeitung von Betonen mit sehr weicher Konsistenz, z. B. Fließbeton, gelten besondere Regeln. Hier ist vor allem darauf zu achten, dass Fließbeton ausreichend Mehlkorn enthält, damit er nach Zugabe des Fließmittels nicht entmischt (s. DAfStb-Richtlinie für Fließbeton [Ri4]).

Darüber hinaus kommen neuerdings so genannte „*Selbstverdichtende Betone*“ (s. Abschnitt II.4.6) zur Anwendung, bei denen kein Eintrag von Verdichtungsenergie notwendig ist. Derartige Betone verfügen aufgrund ihrer besonderen Zusammensetzung über selbstverdichtende und selbstentlüftende Eigenschaften.

Weitere Betone, die nach besonderen Herstell- und Verdichtungsverfahren bezeichnet werden, sind z. B. Schleuder- und Vakuumbeton (s. Abschnitt II.10) sowie Walzbeton (Abschnitt II.12).

## 9.5 Entschalen des Betons

Sobald der Beton ausreichende Festigkeit aufweist, kann er entschalt werden. In besonderen Fällen kann dieses *Entschalen* sofort nach der Verdichtung erfolgen, z. B. bei grünstandfesten Betonen in der Betonwarenherstellung (s. Abschnitt II.9.4). Nur geringfügig erhärtet darf der Beton sein, wenn er eine Gleitschalung verlässt (s. Abschnitt II.10.3).

DIN 1045-3 enthält keine Anhaltswerte für *Ausschalfristen* mehr wie die bisherige DIN 1045, da es sinnvoller ist, darüber im Einzelfall verantwortlich zu entscheiden. Gerüste und Schalungen dürfen erst dann entfernt werden, wenn der Beton eine ausreichende Festigkeit erreicht hat, um die auf das Bauteil aufgebrachten Lasten aufnehmen zu können und ungewollte Durchbiegungen aus elastischem und plastischem Verhalten des Betons sowie eine Beschädigung der Oberflächen und Kanten durch das Ausschalen zu vermeiden.

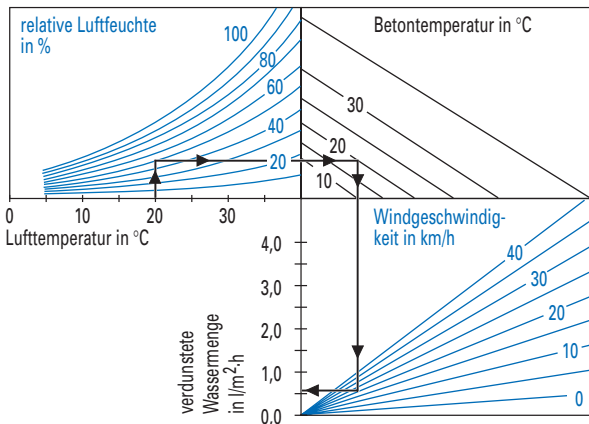
Dafür sind erforderlichenfalls Erhärtungsprüfungen durchzuführen, die den jeweils verwendeten Beton und die Temperatur am Bauwerk berücksichtigen.

## 9.6 Nachbehandlung und Schutz des Betons

Unter *Nachbehandlung* von Beton werden alle Maßnahmen verstanden, die den Beton bis zur ausreichenden Erhärtung gegen schädliche Einflüsse, wie z. B. sehr niedrige oder auch zu hohe Temperaturen, starkes Austrocknen sowie chemische Angriffe, schützen. Darüber hinaus ist der Beton gegen mechanische Beanspruchungen, wie beispielsweise schädliche Erschütterungen, Stöße oder Beschädigungen, zu schützen.

In der Praxis werden die Gefahren zu schnellem Austrocknens oder frühzeitigem Gefrierens häufig nicht ausreichend beachtet. Wird dem Beton das Wasser, das er für eine ausreichende Erhärtung benötigt, frühzeitig entzogen, so kann es vorwiegend in den oberflächennahen Schichten zu Erhärtungsstörungen kommen. Hierdurch können Festigkeitseinbußen, Absandungen, Schwindrisse und hohe Durchlässigkeiten gegenüber Wasser und Gasen auftreten. Da die Hydratation bzw. die Festigkeitsentwicklung und Zunahme der Dichtheit der Betonoberfläche aber direkt von der Dauer des ausreichenden Wasserangebots im Zementleim abhängt, wird anhand der in Bild I.5.7-3 dargestellten Abhängigkeit zwischen Hydratationsgrad und Wasserdurchlässigkeit deutlich, wie ausschlaggebend die Nachbehandlung für die Güte und Dauerhaftigkeit von Betonoberflächen ist.

Die Verdunstungsgeschwindigkeit des Wassers aus dem frischen Beton wird vor allem durch die Temperatur (Beton und Umgebung), die relative Luftfeuchtigkeit der umgebenden Luft und durch die Windgeschwindigkeit beeinflusst. Den ungefähren Zusammenhang zwischen diesen Größen zeigt **Bild II.9.6-1**. Wie



**Bild II.9.6-1: Austrocknungsverhalten von Beton in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Temperatur**

aus dieser Darstellung hervorgeht, beträgt die verdunstete Wassermenge aus  $1\text{ m}^2$  Betonoberfläche  $0,6\text{ l}$  Wasser je Stunde bei Luft- und Betontemperaturen von  $20^{\circ}C$ , einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $50\%$  und einer mittleren Windgeschwindigkeit von  $20\text{ km/h}$ . Bei sommerlichen Temperaturen sowie bei höheren Betontemperaturen als die der Luft und größer werdenden Temperaturdifferenzen zwischen Beton und Luft erhöht sich die Wasserverdunstung. Das Bild zeigt sehr deutlich, dass die Verdunstung nicht nur durch die Temperatur, sondern noch stärker durch den Wind beeinflusst wird. Darauf ist insbesondere bei flächenhaften und exponierten Bauteilen zu achten, wie beispielsweise bei Decken und Estrichen.

Ein Beispiel verdeutlicht die Bedeutung dieser Zahlen für die Praxis: Ein Frischbeton mit  $180\text{ l}$  Wasser je  $\text{m}^3$  enthält je  $\text{m}^2$  in

einer 1 cm dicken Schicht 1,8 l Wasser. Die Verdunstungsrate von 0,6 l/m<sup>2</sup> und Stunde bedeutet rechnerisch, dass dem Beton innerhalb von drei Stunden bereits eine Wassermenge entzogen wird, die dem Gesamtwassergehalt einer 1 cm dicken Betonschicht entspricht. Das damit verbundene Kapillarschwinden, die Neigung zur Rissbildung und die negativen Auswirkungen auf Festigkeit, Verschleißwiderstand und Dichtigkeit der oberflächennahen Bereiche sind erheblich. Die Dauer der Nachbehandlung muss deshalb so bemessen sein, dass auch die oberflächennahen Zonen eine ausreichende Festigkeit und Dichtheit des Betongefüges erreichen, die für die Dauerhaftigkeit des Betons und den Korrosionsschutz der Bewehrung erforderlich sind.

Die Festigkeitsentwicklung wiederum hängt eng mit der Betonzusammensetzung, der Frischbetontemperatur, den Umgebungsbedingungen und den Bauteilabmessungen zusammen, und entsprechend wird auch die erforderliche Nachbehandlungsdauer davon beeinflusst.

Im Zuge der europäischen Normung werden auch einheitliche europäische Regeln für die Nachbehandlung geschaffen. Hierüber wird ausführlich in [Grü2] berichtet. Das Prinzip des europäischen Entwurfs ist in DIN 1045-3 enthalten. Es basiert darauf, dass so lange nachbehandelt werden muss, bis im Bauteil 50 % der charakteristischen Festigkeit  $f_{ck}$  erreicht ist. Vom Betonhersteller wird zur Festlegung der erforderlichen Nachbehandlungsdauer eine Angabe zur Festigkeitsentwicklung des jeweiligen Betons verlangt. Die Angabe basiert auf dem Verhältnis der 2- zur 28-Tage-Druckfestigkeitsmittelwerte bei 20 °C und führt zu einer Einteilung in die Bereiche schnelle, mittlere, langsame und sehr langsame Festigkeitsentwicklung. Die Mindstdauer der Nachbehandlung, die nach DIN 1045-3 vorgeschrieben wird, orientiert sich an diesen Bereichen der Festigkeitsentwicklung. In **Tafel II.9.6-1** ist die Mindstdauer der Nachbehandlung in

**Tafel II.9.6-1: Mindestdauer der Nachbehandlung von Beton gemäß DIN 1045-3 bei den Expositionsklassen nach DIN 1045-2 außer X0, XC1 und XM**

Festigkeitsentwicklung des Betons <sup>1)</sup>				
$r = f_{cm2}/f_{cm28}^{2)}$	$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$	$r < 0,15$
Oberflächen- temperatur $\vartheta$ in °C	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen <sup>3)</sup>			
$\vartheta \geq 25$	1	2	2	3
$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	4	5
$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7	10
$10 > \vartheta \geq 5^4)$	3	6	10	15

<sup>1)</sup> Die Festigkeitsentwicklung beschreibt das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 und 28 Tagen (aus Erstprüfung oder Betone vergleichbarer Zusammensetzung).

<sup>2)</sup> Lineare Interpolation zwischen den r-Werten ist zulässig.

<sup>3)</sup> Bei mehr als 5 h Verarbeitungszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.

<sup>4)</sup> Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeit zu verlängern, in der die Temperatur Werte unter 5 °C aufweist.

Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons und der Oberflächentemperatur zusammengestellt. Die Festigkeitsentwicklung bzw. die daraus abgeleitete erforderliche Nachbehandlungsdauer wird damit auch zu einem Merkmal der Sortenkennzeichnung von Transportbeton. Im Einzelfall erlaubt DIN 1045-3 ausdrücklich auch den genauen Nachweis der Festigkeitsentwicklung. Eine danach bestimmte Mindestnachbehandlungsdauer führt dann zu Unterschieden im Stundenbereich, was jedoch baupraktisch wenig sinnvoll erscheint.

Die Verfahren und Methoden, die zur Nachbehandlung von Beton eingesetzt werden, müssen sicherstellen, dass ein über-

mäßiges Verdunsten von Wasser über die Betonfläche verhindert wird. Nach Abschluss des Verdichtens und gegebenenfalls der Oberflächenbearbeitung des Betons ist die Oberfläche sobald wie möglich nachzubehandeln.

Folgende Verfahren sind sowohl alleine als auch in Kombination für die Nachbehandlung geeignet, wobei grundsätzlich zwischen wasserrückhaltenden und wasserzuführenden Maßnahmen unterschieden werden kann:

- a) wasserrückhaltende Nachbehandlungsmaßnahmen
  - Belassen in der Schalung
  - Abdecken der Betonoberfläche mit dampfdichten Folien, die an den Kanten und Stößen gegen Durchzug gesichert sind
  - Anwendung von Nachbehandlungsmitteln mit nachgewiesener Eignung als wirksamer Verdunstungsschutz
- b) wasserzuführende Nachbehandlungsmaßnahmen
  - Auflegen von wasserspeichernden Abdeckungen unter ständigem Feuchthalten bei gleichzeitigem Verdunstungsschutz
  - kontinuierliches Besprühen mit Wasser
  - Unterwasserlagerung (Fluten)

In **Tafel II.9.6-2** sind geeignete *Nachbehandlungsmaßnahmen* für Beton in Abhängigkeit von den herrschenden Außentemperaturen zusammengestellt.

*Nachbehandlungsmittel* sind in der Regel nicht zulässig in Arbeitsfugen, für Oberflächen, die beschichtet werden sollen, oder für Oberflächen, an denen ein Verbund zu anderen Materialien erforderlich ist. Hier sind entweder andere Nachbehandlungsmaßnahmen zu wählen oder es ist nachzuweisen, dass keine nachteilige Auswirkung auf die nachfolgenden Arbeiten besteht, oder die Nachbehandlungsmittel sind vollständig von der Betonoberfläche zu entfernen.

**Tafel II.9.6-2: Geeignete Nachbehandlungsmaßnahmen für Beton in Abhängigkeit von den herrschenden Außentemperaturen [Bay1]**

Art	Maßnahmen	Außentemperatur in °C				
		unter -3	-3 bis +5	5 bis 10	10 bis 25	über 25
Folie/Nachbehandlungsfilm/ggf. zusätzlich Wasser	Abdecken bzw. Nachbehandlungsfilm aufsprühen und benetzen; Holzschalung nässen; Stahlschalung vor Sonnenstrahlung schützen					x
	Abdecken bzw. Nachbehandlungsfilm aufsprühen			x	x	
	Abdecken bzw. Nachbehandlungsfilm aufsprühen und Wärmedämmung: Verwendung wärmedämmender Schalung – z. B. Holz – sinnvoll		x <sup>1)</sup>			
	Abdecken und Wärmedämmung: Umschließen des Arbeitsplatzes (Zelt) oder Beheizung (z. B. Heizstrahler); zusätzlich Betontemperaturen wenigstens 3 Tage lang auf +10 °C halten	x <sup>1)</sup>				
Wasser	durch Benetzen ohne Unterbrechung feuchthalten				x	

<sup>1)</sup> Nachbehandlungsdauer um die Zeit mit Temperaturen unter +5°C verlängern; Betonoberfläche mindestens 7 Tage vor Niederschlägen schützen.

Das Erhärten des Betons kann ebenfalls durch eine betontechnologisch richtige Wärmebehandlung beschleunigt werden. Auch Teile, die wärmebehandelt wurden, sollen feucht gehalten werden, da die Erhärtung im Allgemeinen am Ende der Wärmebehandlung noch nicht abgeschlossen ist und der Beton bei der Abkühlung sehr stark austrocknet. Bei der Anwendung einer Wärmebehandlung ist die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zu beachten [Ri17].

Die Richtlinie unterscheidet zwei Arten der Wärmebehandlung von Beton. Zum einen besteht die Möglichkeit, einen so genannten Warmbeton herzustellen, bei dem die Frischbetontemperatur entweder durch Vorwärmen der Ausgangsstoffe oder durch Dampfischen [Me2] erhöht wird. Die andere Möglichkeit der Wärmebehandlung besteht in der Erwärmung des in die Schalung eingebrachten Betons (s. Abschnitt II.11.2).