

10 Besondere Betone

10.1 Spritzbeton

Spritzbeton ist Beton, der mit hohem Druck in einer Schlauch- oder Rohrleitung zur Einbaustelle gefördert, dort durch eine Spritzdüse mit hoher Geschwindigkeit gegen die Auftragsfläche geschleudert und durch den Aufprall verdichtet wird. Das Verfahren eignet sich für alle geneigten Flächen einschließlich Arbeiten „über Kopf“. Der nicht haftende Anteil wird „Rückprall“ genannt. Gängige Anwendungsbereiche für Spritzbeton sind Stollen- und Tunnelbau, Hangsicherungen, Feuerschutzummantelung im Stahlbau und Betoninstandsetzungen, beispielsweise zur Realkalisierung [Wör1, Bot1, Lei1, Ruf1].

Grundsätzlich werden zwei *Spritzverfahren* unterschieden. Beim *Trockenspritzverfahren* wird das Betontrockengemisch durch ventilgesteuerte Schleusenammern der Förderleitung zugeführt und in ihr mittels Treibluft (Dünnstromförderung) zur Spritzdüse gefördert. Erst dort erfolgt die Zugabe von Wasser und gegebenenfalls eines flüssigen Zusatzmittels (Beschleuniger BE). Pulverförmige Beschleuniger können auch der Ausgangsmischung zugegeben werden. Die Konsistenz des aufgespritzten Betons entspricht in der kurzen Zeit bis zum Erstarren einem steifen Beton.

Beim *Nassspritzverfahren* wird der Frischbeton, also das fertige Betongemisch, entweder wie beim Trockenverfahren im Druckluftstrom transportiert (Dünnstromförderung) oder im Dichtstromverfahren durch Pumpen gefördert. Falls hohe Frühfestigkeiten gefordert sind, kann an der Spritzdüse ein flüssiger

Beschleuniger zugegeben werden. Die Konsistenz des Betons entspricht bei der Dünnstromförderung einem steifen bis plastischen Beton und bei der Dichtstromförderung einem plastischen bis weichen Beton. Da die einmal festgelegte Frischbetonzusammensetzung an der Düse nicht mehr verändert werden kann, wird das Nassspritzverfahren bevorzugt dort angewendet, wo ein besonders gleichmäßig zusammengesetzter Spritzbeton gefordert wird.

Die Herstellung und Güteüberwachung von Spritzbeton ist in DIN 18551 geregelt. Der Beton entspricht meist der Festigkeitsklasse C 20/25. Höhere Festigkeitsklassen sind jedoch möglich. Die elastischen sowie die Schwind- und Kriechverformungen sind aufgrund des höheren Zement- und Feinsandgehalts rund doppelt so hoch wie bei üblichem Beton gleicher Festigkeitsklasse [Man5]. Die Betonqualität und die Betonierleistung hängen sehr vom Geschick bzw. dem Ausbildungsgrad des Düsenführers ab. Er beeinflusst durch die Düsenführung den Rückprall und somit auch den Materialverlust und die Betonqualität [Mai1].

Der Beton haftet durch den Schleuderdruck. Aus diesem Grund muss die Auftragfläche sauber, fest und rau sein. Beim Spritzen ist die Spritzdüse bzw. das Strahlrohr möglichst rechtwinklig zur Auftragfläche so zu führen, dass ein gleichmäßig dicker und gleichmäßig verdichteter Auftrag mit geringem Rückprall entsteht. Ein Rückprall von rund 5 M.-% stellt die untere Grenze des technisch Möglichen dar. Unter ungünstigen Bedingungen können aber auch bis zu 50 M.-% Rückprall auftreten [Wes1]. Der zweckmäßige Abstand der Spritzdüse von der Auftragfläche richtet sich nach der Austrittsgeschwindigkeit des Betons. Im Allgemeinen beträgt der Abstand zwischen 0,50 und 1,50 m.

Beim Festlegen der Betonzusammensetzung ist zu berücksichtigen, dass beim Aufspritzen insbesondere gröbere Teile des

Betons zurückprallen und demzufolge der anhaftende Spritzbeton von der Ausgangsmischung in Richtung auf eine mehlkorn- und sandreichere Zusammensetzung hin abweicht. Es ist daher sicherzustellen, dass der aufgespritzte Beton die geforderten Eigenschaften aufweist. Der Zementgehalt beträgt je nach Beschleunigerzusatz zwischen 270 und 450 kg/m³. Die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung, in der Regel Sand und Kies mit einem Größtkorn von 8 bzw. 16 mm, soll zwischen den Sieblinien A und B liegen. Die gewählte Kornzusammensetzung muss während des Spritzbetonauftrags in engen Grenzen eingehalten werden.

Da der aufgebrauchte Beton sofort standfest sein muss, wird zum schnellen Ansteifen in den meisten Fällen ein Erstarrungsbeschleuniger (BE) als *Spritzbetonhilfe* eingesetzt. Die insbesondere im Tunnelbau erforderliche hohe Frühfestigkeit der Spritzbetone wurde in der Regel bisher mit alkalihaltigen Beschleunigern erreicht [Mai2, Bre2, Ruf2, Mai3].

Neben den rein spritztechnischen und bautechnischen Anforderungen werden im *Tunnelbau* Anforderungen an das Auslagverhalten von Spritzbetonaußenschalen gestellt. Ursache hierzu sind signifikante pH-Wert-Erhöhungen im Bergwasser, das zum Abbau des Wasserdrucks bergseitig vor der Tunnelschale durch Drainagen abgeführt wird und dann z. B. dem Oberflächengewässer als Vorflut zugeführt werden muss. Hohe und zugleich lang andauernde *Alkaliauslaugungen* aus der Spritzbetonaußenschale sind im Wesentlichen die Folge des Einsatzes von Spritzbetonbeschleunigern mit hohen Alkaligehalten. Der Einsatz dieser Beschleuniger erhöht nicht nur signifikant den Alkaligehalt in der Spritzbetonaußenschale, sondern hat in der Regel auch eine hohe Kapillarporosität dieser Außenschale zur Folge, die sich zum Beispiel in Endfestigkeitseinbußen von bis zu 40 % zeigt. Neben der Notwendigkeit, die Alkalifrachten zu neutrali-

sieren, besteht die Gefahr, dass die gelösten Bestandteile in den Tunneldrainagen ausfallen und dadurch Versinterungen hervorrufen, die umfangreiche Wartungsarbeiten notwendig machen. Wenn die *Auslaugung* von Tunnelaußenschalen begrenzt werden muss, ist dazu ein ausreichend gefügedichter Spritzbeton eine unbedingte Voraussetzung.

Um die durch die Verwendung von alkalihaltigen Beschleunigern bedingten Nachteile zu vermeiden, werden verschiedene Wege beschritten. Einerseits sind von der Zementindustrie schnell erstarrende *Spritzbetonzemente* entwickelt worden, bei deren Verwendung ein *Beschleuniger* nicht notwendig ist [Eic2, Man6]. Mit gleichem Ziel sind andererseits von der Bauchemie alkalifreie Beschleuniger entwickelt worden. Erhöhte Festigkeit und geringeres Auslaugen wurden auch durch die Zugabe von Silicastaub erreicht. Diese Maßnahmen erhöhen die Festigkeit und ermöglichen unter Umständen eine Verminderung der statisch erforderlichen Dicke der Spritzbetonaußenschale.

Das Trockenspritzverfahren wird wirtschaftlicher bei kleinen Fördermengen eingesetzt. Während Trockengemische, die zum Beispiel in Transportbetonwerken mit feuchten Gesteinskörnungen hergestellt werden, nur bis zu rund drei Stunden verarbeitbar sind, können Trockengemische, deren gesamte Ausgangstoffe vorgetrocknet sind, über einen längeren Zeitraum vorgehalten werden. Eine Zwischenlagerung in den Umschlaggeräten ist möglich, sodass die Spritzarbeiten im Gegensatz zum Nassspritzverfahren kurzfristig unterbrochen und wieder aufgenommen werden können. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem Nassspritzverfahren liegt darin, dass der Spritzschlauch mit Düse ein geringeres Gewicht aufweist und dadurch Spritzen über Kopf und bei beengten Platzverhältnissen besser möglich ist.

Das Nassspritzverfahren ist wirtschaftlich einsetzbar bei großen Fördermengen, da es eine hohe Spritzleistung aufweist. Im Ver-

gleich zum Trockenspritzverfahren weist das Nassspritzverfahren geringere Rückprallwerte auf und aufgrund der werkmäßigen Herstellung einschließlich Wasserzugabe ist eine gleichmäßigere Qualität der Festbetoneigenschaften herstellbar.

Eine besondere Art des Spritzbetons ist der *Faserspritzbeton*, der vorwiegend mit *Stahlfasern* hergestellt wird. Für Stahlfaserspritzbeton gelten im Allgemeinen die Regeln für Spritzbeton. Üblicherweise werden Stahlfasern mit einem Durchmesser zwischen 0,3 und 0,5 mm bei einer Länge zwischen 15 und 30 mm eingesetzt. Die Zugabemenge liegt bei rund 1 bis 2 Vol.-%. Stahlfaserspritzbeton wird vor allem dort angewendet, wo die Zugfestigkeit und das Arbeitsvermögen des normalen Spritzbetons nicht ausreichen oder eine geringere Dicke wirtschaftlicher ist.

10.2 Schleuderbeton

Das Schleuderverfahren dient der Herstellung von rotations-symmetrischen Hohlkörpern aus Beton. Das erste Patent für *Schleuderbeton* wurde 1907 von der Baufirma Otto & Schlosser, Meissen, angemeldet. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurden die ersten Schleuderbeton-Maste hergestellt [Bac1].

Beim Schleuderbeton wird der plastische bis weiche Beton mit Wasserzementwerten zwischen 0,35 und 0,55 durch die Zentrifugalkraft eines mit 300 bis 900 U/min rotierenden Hohlkörpers nach außen gedrückt und verteilt sich in gleichmäßiger Dicke auf den Wandungen. Eine begrenzte Entmischung (grobe Gesteinskörnung außen, wasserreicher Mörtel innen) ist damit stets verbunden. Überschüssiges Wasser läuft nach innen ab, die Poren schließen sich. Dadurch kann man einen sehr niedrigen Wasserzementwert zwischen 0,25 und 0,30 erreichen. Der

Schleudervorgang selbst dauert je nach Art des Produkts etwa 8 bis 15 Minuten.

Bei der Schleuderbetonherstellung wird normalerweise der Erstarrungs- und Erhärtungsvorgang durch Wärmebehandlung mittels entspanntem Nassdampf zusätzlich beschleunigt. Dadurch ist es möglich, schlaffbewehrte Produkte bereits nach drei bis vier Stunden zu entschalen.

Schleuderbeton wird zur Herstellung von hochfesten Betonhohlkörpern, z. B. Rohren, Masten, Pfählen, Pfeilern, und Stützen verwendet [Bru1, Bac1, Rud1]. Ebenfalls im Schleuderverfahren hergestellt werden Zementmörtelauskleidungen in Stahl- und Gussrohren als dauerhafter Korrosionsschutz für Trinkwasser- und Abwasserrohre (s. DIN 2880).

10.3 Gleitbauverfahren

Das *Gleitbauverfahren* dient der kontinuierlichen Herstellung von Betonbauteilen „am Strang“ mit einer verschiebbaren Schalung. Anwendungsbereiche der Gleitbauweise sind im wesentlichen Bauwerke mit großen Höhen und wenig veränderlichen Querschnitten über die Gleithöhe, wie beispielsweise Wände, Stützen, Treppenhäuser, Silos und Türme [Dum1, Bee1, Her2, Dok1], aber auch horizontal hergestellte Bauteile, insbesondere im Bereich des Verkehrswegebbaus (s. Abschnitt II.12), wie beispielsweise Betondecken, feste Fahrbahnen oder Betonschutzwände. Die Besonderheit gegenüber der Herstellung in feststehender Schalung besteht im Wesentlichen darin, dass die Schalung entlang der Betonoberfläche gezogen wird, während der Beton noch frisch im oberen (vorderen) und noch „jung“ im unteren (hinteren) Teil der Schalung ist.

Die bei Anwendung des Gleitbauverfahrens geltenden Anforderungen an Bemessung, bauliche Durchbildung und Bau-

ausführung von Bauteilen aus Stahlbeton und Spannbeton sind in DIN 1045-1 festgelegt. Weiterführende Hinweise zum Gleitbauverfahren sind im Merkblatt des Deutschen Beton-Vereins e.V. [Me13] zusammengefasst.

Beim Gleitbauverfahren im Hochbau wird eine ca. 1,20 m hohe Schalung mit Hilfe von Hebegeräten zumeist an Kletterstangen gehoben, sodass oben in etwa 20 cm dicken Schichten Frischbeton eingefüllt werden kann und unten aus der Schalung das fertige Bauteil „austritt“. Übliche Leistungen sind 5 bis 7 m pro Tag.

Während des Gleitens treten Reibungskräfte auf, die so klein gehalten werden müssen, dass der Beton weder in der Kontaktfläche zur Schalung noch über den Querschnitt aufreißt (**Bild II.10.3-1**). Einem „Ankleben“ der Schalung an den Beton wird durch die nach unten etwas konisch erweiterte Form der Schalung und weiterhin durch sehr gleichmäßige Hubtakte vorgebeugt. Die mit Stahlblech ausgekleidete Schalung sollte dementsprechend keine „Beulen“ aufweisen. Ferner muss der aus der Schalung austretende Beton ausreichend standsicher sein, um die Frischbetonlast tragen zu können.

Das Erstarren des Betons muss auf den raschen Baufortschritt abgestimmt sein. In gleichen Höhen innerhalb der Schalung muss zu gleichen Zeiten der gleiche Erstarrungszustand vorhanden sein. Der Zement muss daher nicht nur nach der Festigkeit, sondern auch nach seinem *Erstarrungsverhalten* und seinem *Wasserrückhaltevermögen* ausgewählt werden. Insbesondere müssen in Erstprüfungen die Betontemperaturen im Bauteil richtig abgeschätzt und bei der geplanten Gleitgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Dem entsprechend sind Zementart, Festigkeitsklasse, Zusatzstoffe und Zusatzmittel auszuwählen. Zement- bzw. Mehlkorngelalt müssen darüber hinaus so eingestellt werden, dass genügend „Schmierstoff“ zur Verfügung steht und die Schalungsreibung möglichst gering bleibt.

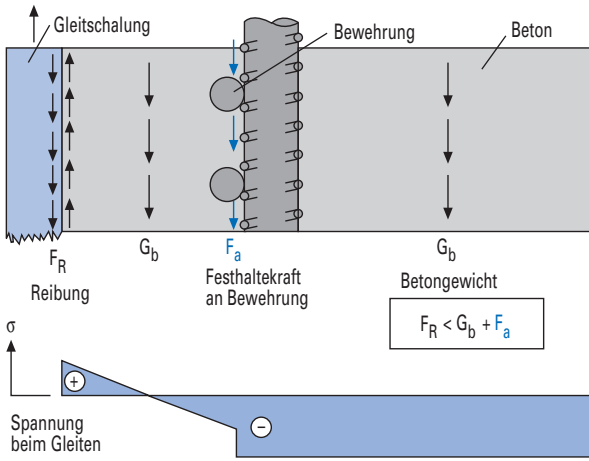


Bild II.10.3-1: Annahme über den Spannungsverlauf in einer Betonwand beim Gleitbauverfahren

Das frühe Entschalen eines sehr jungen Betons schon nach einigen Stunden hat zur Folge, dass im Vergleich zu anderen Betonierverfahren der *Nachbehandlung* eine übergeordnete Bedeutung zukommt. Nachdem der junge Beton die Gleitschalung verlassen hat, wird er zunächst abgerieben. Weitere Maßnahmen sind beispielsweise das Aufsprühen von Nachbehandlungsfilmen (s. Abschnitt II.9.6) und das Einhausen durch ein Hängegerüst. Der junge Beton muss besonders sorgfältig gegen große Temperaturunterschiede im Querschnitt und gegen Witterungseinflüsse geschützt werden.

10.4 Massenbeton

Unter *Massenbeton* wird Beton für massige Bauteile, wie zum Beispiel Stützmauern, Gründungssohlen, Brückenpfeiler, Schleusenammerwände, Stau Mauern, Kernkraftwerke etc., verstanden [Kol2].

Gemäß dem Merkblatt des Deutschen Beton-Vereins [Me8] spricht man von Massenbeton, wenn mindestens eine der folgenden Voraussetzungen erfüllt ist:

- a) Die Wärmeentwicklung im Bauteil aufgrund der *Hydrationswärme* des Zements muss berücksichtigt werden. (s. Abschnitt II.5)
- b) Die Bauteilabmessungen sind so groß, dass besondere Einbauverfahren und/oder eine besondere Baustellenlogistik notwendig sind.

Je nach Bauteilabmessung, Betonzusammensetzung, Temperaturbedingungen und Bauablauf erhöhen sich besonders im Kern des Bauteils die Temperaturen deutlich (s. Bild II.5.3-2). Durch das Abfließen der Wärme von innen nach außen stellt sich im Bauteil ein Temperaturgradient ein, der Zugspannungen an der Betonoberfläche zur Folge haben kann (s. Bild II.5.3-1).

Um diese *Zwangbeanspruchung* so gering wie möglich zu halten, gibt es verschiedene Maßnahmen zur Temperaturminderung [Me31]. Von entscheidender Bedeutung ist die Wahl und Abstimmung der richtigen Betonzusammensetzung auf die jeweiligen Gegebenheiten.

Für Massenbeton sind in der Regel Zemente mit niedriger Hydrationswärme (NW-Zemente nach DIN 1164) vorteilhaft. Üblicherweise werden bevorzugt Hochofenzemente mit hohem Hüttensandanteil verwendet. Im Interesse einer niedrigen Hydrationswärmeentwicklung sollte stets der geringst mög-

liche Bindemittelgehalt angestrebt werden, mit dem die an den Beton gestellten Anforderungen zuverlässig erfüllt werden. In Ausnahmefällen sind auch Abweichungen vom bestehenden Regelwerk sinnvoll. Hierzu zählen beispielsweise die Vereinbarung eines späteren Nachweistermins für Festbetoneigenschaften (z. B. Druckfestigkeit nach 90 Tagen).

Da besonders bei hochbewehrten Bauteilen aus Gründen der Verarbeitbarkeit und des Korrosionsschutzes ein bestimmtes Leimvolumen notwendig ist, wird vielfach eine zusätzliche Menge an geeigneter Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450 als puzzolanischer Betonzusatzstoff eingesetzt. So wurden bei größeren Bauobjekten in den letzten Jahren bevorzugt Kombinationen von CEM III/A 32,5 N oder CEM III/B 32,5 N mit 10 bis 20 M.-% Steinkohlenflugasche, bezogen auf den Zement-plus Zusatzstoffgehalt, verwendet [Ker1, Kot1, Koc2].

Das Größtkorn der Gesteinskörnung beträgt in der Regel 32 mm. Es wird bei unbewehrten Massenbetonbauteilen, zum Beispiel im Talsperrenbau, auf 64 bis 125 mm erhöht. Bei sehr stark bewehrten Bauteilen kann eine Reduzierung des Größtkorns auf 16 bzw. 8 mm notwendig werden.

Als Zusatzmittel werden für massige Bauteile häufig Verzögerer eingesetzt, damit ein einwandfreies Verdichten („Vernähen“) der einzelnen Betonierlagen sichergestellt ist. Ebenso haben sich Fließmittel mit verzögernder Wirkung bewährt.

10.5 Unterwasserbeton

10.5.1 Anwendungsbereiche und Verfahren

Die Herstellung von *Unterwasserbeton* [Ger1, Mor2, CUR1, Gru7, Teg1] bietet sich überall dort an, wo die Trockenlegung von Baugruben aus technischen oder wirtschaftlichen Erwägungen unvorteilhaft ist, wie z. B. beim Herstellen von Brücken-

pfeilern im Wasser. Auch die Herstellung von bewehrten Großbohrpfählen im Grundwasserbereich beruht allein auf der zielsicheren Herstellung von Unterwasserbeton. Für unbewehrte Bodenplatten, beispielsweise Hafensohlen, ist Unterwasserbeton erforderlich, da eine trockene Baugrube kaum herstellbar ist. Bei sehr großen und tiefen Baugruben im Grundwasser, die später trockengelegt werden sollen, hat sich unbewehrter Unterwasserbeton seit Jahrzehnten zum Ausgleich der Auftriebskräfte und zur Abdichtung bewährt. Werden dabei die Auftriebskräfte nicht durch die Eigenlast der Sohlplatte aufgehoben, so kann man die Gewölbetragwirkung dieser Platten nutzen, um die Auftriebskräfte auf geeignete Verankerungen zu übertragen [Bre3].

Wenn Unterwasserbeton für tragende Bauteile eingesetzt werden soll, muss er den Anforderungen der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 genügen. Mit Unterwasserbeton lassen sich alle Betonfestigkeitsklassen sowie Wasserundurchlässigkeit und hoher Widerstand gegen chemische Angriffe erzielen. Die Herstellung des Unterwasserbetons, die heute meist in Transportbetonwerken stattfindet, unterscheidet sich nicht von der für Beton, der über Wasser eingebracht wird. Es ist Aufgabe der Ausführungstechnik, den Mörtel oder Beton entmischungsfrei am vorgesehenen Ort einzubauen. Eine fließfähige Konsistenz der Mörtel oder Betone ist dafür im Allgemeinen erforderlich, weil eine Verdichtung zum Beispiel durch Rüttler in der Regel nicht möglich ist.

Grundsätzlich kann man zwei Verfahrenstechniken für die Herstellung von Unterwasserbeton unterscheiden [Gru7]. Bei der ersten Gruppe „Beton für Unterwasserschüttung“ (s. Abschnitt II.10.5.2) wird fertig gemischter Frischbeton unter Wasser mit Hilfe von Fallrohren (Contractorverfahren), Spezialkübeln, Fallschläuchen (Hydroventilverfahren) oder Pumpleitungen eingebracht. Bei der zweiten Gruppe „Ausgussbeton“ (s. Abschnitt II.10.5.3) wird ein vorher eingebrachtes Schottergerüst mit

Zementmörtel unter Wasser injiziert (Prepakt- und Colcreteverfahren). Im Folgenden wird auf diese beiden Verfahren näher eingegangen.

10.5.2 Beton für Unterwasserschüttung

Beton für *Unterwasserschüttung* ist Beton, der unter Wasser geschüttet wird, wobei das Wasser in der Baugrube ruhig, also ohne Strömung, stehen muss. Die Wasserstände innerhalb und außerhalb der Baugrube sollen sich ausgleichen können. Die Zusammensetzung des Betons muss so beschaffen sein, dass er als zusammenhängende Masse fließt und ohne Verdichtung ein geschlossenes Gefüge aufweist. Zu bevorzugen sind Kornzusammensetzungen mit stetigen Sieblinien, die etwa in der Mitte zwischen den Sieblinien A und B liegen. Der Mehlkorngesamtgehalt muss ausreichend groß gewählt werden. Das Ausbreitmaß von Unterwasserbeton soll im Bereich zwischen 45 und 50 cm liegen. Es kann auch Fließbeton eingesetzt werden.

Nach DIN 1045-2 darf der Wasserzementwert 0,60 nicht überschreiten. Der Wasserzementwert muß kleiner sein, wenn andere Beanspruchungen es erfordern (z. B. Expositionsklasse XA2). Bei Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn von 32 mm muss der Zementgehalt mindestens 350 kg/m^3 Beton betragen. Entsprechend zusammengesetzte Betone erfüllen die Anforderungen an wasserundurchlässigen Beton und sind erfahrungsgemäß gut pumpbar.

Nach DIN 1045-2 darf Flugasche angerechnet werden. Dabei darf der Gehalt an Zement plus Flugasche 350 kg/m^3 nicht unterschreiten. Der Wasser/(Zement + $0,7 \times$ Flugasche)-Wert darf 0,60 nicht überschreiten. Ferner muss die Höchstmenge Flugasche, die auf den Wasserzementwert angerechnet werden darf, der Bedingung $\text{Flugasche/Zement} \leq 0,33$ genügen.

Im Folgenden werden einige Verfahren für die Herstellung von Unterwasserbeton vorgestellt:

Contractor-Verfahren

Das *Contractor-Verfahren* [CUR2, Con1, Ger2, Tod1] wird seit rund 90 Jahren angewendet. Es stellt eine der ältesten bekannten Methoden zur Einbringung von Unterwasserbeton dar. Das Prinzip ist im **Bild II.10.5-1** dargestellt.

Ein Trichter mit bis auf den Boden reichendem dichtem Schüttrohr aus Stahl wird höhenverschiebbar in die Baugrube eingestellt. Das Schüttrohr hat in der Regel einen Durchmesser zwischen 20 und 30 cm.

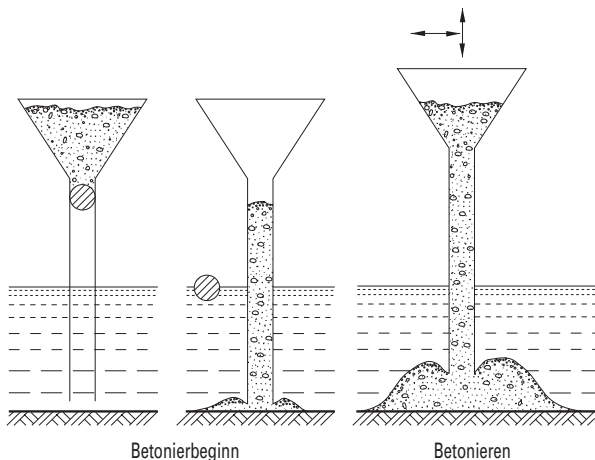


Bild II.10.5-1: Prinzipskizze für das Contractorverfahren

Die Herstellung annähernd ebener Sohlen auch unter Verwendung mehrerer Schütteinrichtungen ist schwierig und aufwendig. Schichten mit gleichförmigem Gefüge und gleich bleibender Güte lassen sich nur bei Dicken von mindestens 1,0 bis 1,5 m erzielen. Der feste Einbau des Geräts in freier Baugrube ist aufwendig, das Gerät lässt sich nur umständlich bewegen. Die erzielbare Einbaugeschwindigkeit ist demzufolge gering.

Kübelverfahren

Das *Kübelverfahren* [CUR2, Con1] ist eine in den Niederlanden verbreitete Methode zur Einbringung von Frischbeton unter Wasser. Es bedingt die Verwendung eines Spezialkübels, in dem der einzubringende Frischbeton ohne Berührung mit dem umgebenden Wasser bis an die Einbaustelle gebracht werden kann. Erst dort wird der Auslauf geöffnet, und zwar so, dass der Beton stets direkt auf die Baugrubensohle oder auf den bereits vorhandenen Beton ausläuft. Öffnen und Schließen des Kübels sollten hydraulisch steuerbar sein.

Das Betonieren kann bei freier Baugrube an beliebiger Stelle begonnen oder fortgesetzt werden, ein kontinuierliches Betonieren ist jedoch nicht möglich.

Hydroventilverfahren

Das *Hydroventilverfahren* [CUR2, Hil4, Sch14] ist eine niederländische Entwicklung zur Herstellung von Unterwasserbeton. Das Gerät besteht aus einem Trichter und einem zusammen-drückbaren Fallschlauch (**Bild II.10.5-2**). Der Schlauch endet in einem Stahlzylinder, der mit Ketten am Trichter höhenverstellbar angehängt ist. Dieser Auslaufzylinder dient zur Führung und Beschwerung des Schlauches. Zwischengeschaltete Stahlreifen, die mit den Ketten und dem Fallschlauch an einzelnen Punkten

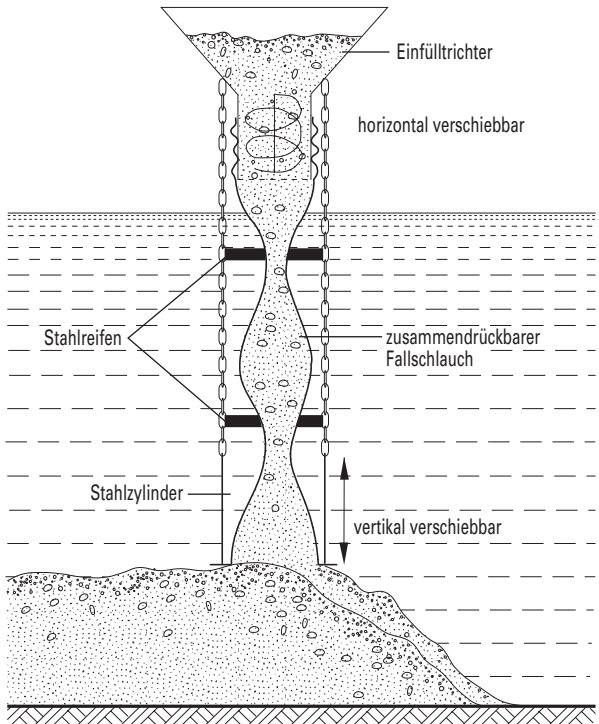


Bild II.10.5-2: Prinziplskizze für das Hydroventilverfahren

verbunden sind, sorgen für eine lockere, jedoch geordnete Lage des Fallschlauches. Mit ihrer Hilfe kann der Fallschlauch unterhalb des Trichters wie eine Ziehharmonika verkürzt und damit auf die gewünschte Länge gebracht werden.

Wird eine ausreichende Menge Beton in den Trichter gegeben, so gleitet sie in Form eines geschlossenen Ballens langsam im Schlauch, der durch den Wasserdruck zusammengepresst ist, hinunter. Dabei wirken auf den Beton neben der Eigenlast der äußere Wasserdruck und die Reibung zwischen Beton und Schlauchwandung. Mit dem Betonierfortschritt wird der Auslaufzylinder aufgezo- gen, bis die gewünschte Sollhöhe erreicht ist. Das Verfahren vermeidet mit hoher Sicherheit den freien Fall des Betons durch das Wasser. Der Beton lässt sich kontinuierlich und mengengesteuert einbringen.

Zur Herstellung von Sohlplatten werden mehrere nebeneinander angeordnete Geräte verwendet und nach Erreichen der Sollhöhe in horizontaler Richtung verschoben. Dazu ist jedoch nicht nur ein Verbindungsrahmen zwischen Trichter und Auslaufzylinder, sondern auch zwischen den Trichtern untereinander erforderlich.

Vervollkommenet wird das Hydroventilverfahren durch Dosierschnecken im Trichterauslauf, Höhenkontrollrichtungen und Abziehbohlen.

Pumpverfahren

Seit der Entwicklung leistungsfähiger Betonpumpen ist es möglich geworden, Beton in Rohrleitungen geringen Durchmessers von beispielsweise 100 mm zu fördern [CUR2, Con1, Lin1]. Damit sind die Voraussetzungen für ein ebenso einfaches wie sicheres Verfahren zur Herstellung von Unterwasserbeton gegeben.

Lässt man ein Pumprohr unter Wasser auf einer Baugrubensohle enden, so werden beim Einschalten der Pumpe zunächst das Wasser und die Luft, die sich in der Leitung befinden, hinausgedrückt, dann folgt der Beton. Die Kontaktfläche des austretenden Betons mit dem umgebenden Wasser ist so gering wie bei

einem ideal funktionierenden Contractorverfahren. Im Gegensatz zum Contractorverfahren gelingt es hier jedoch ausnahmslos, den neu hinzukommenden Beton in die bereits vorhandene Betonmasse „hineinzudrücken“. Dieser günstige Sachverhalt wurde von Grube [Gru7] zu einem in der Praxis verwendbaren Betonierverfahren weiterentwickelt. Die freie Beweglichkeit der Rohrleitung wurde durch einen Pumpenausleger mit herabhängendem Druckschlauch erreicht.

Verlängert man den Schlauch am Ende durch ein Betonierrohr, dessen Länge größer ist als die Wassertiefe, so gelingt es, sowohl das leere Rohr bis auf die Baugrubensohle abzusenken als auch zu verhindern, dass das Rohr durch den Pumpendruck aus der Betonmasse herausgehoben wird.

Mit einem einfachen Peilstab wird die erreichte Betonierhöhe kontrolliert. Der Peilstab gibt auch an, wie tief das Rohrende jeweils im Beton steckt. Verlangt werden mindestens 20 cm. Das Betonierrohr kann an beliebiger Stelle herausgezogen und wieder eingesetzt werden. Beim erneuten Eintauchen kann nur wenig Wasser von unten in die Rohrleitung eindringen, weil sie oben verschlossen ist.

Hydrocreteverfahren

Hydrocrete ist die Bezeichnung für ein Einbauverfahren von wasserundurchlässigem Unterwasserbeton mit Kübeln oder Pumpen. Der Beton ist dabei im frischen Zustand so erosionsfest, dass er ohne Entmischung und ohne Auswaschung von Zement unter Wasser mehrere Meter frei abstürzen kann und selbst 10 cm dicke Platten sicher unter Wasser betoniert werden können. Er braucht nicht verdichtet zu werden und nivelliert sich durch Fließen auf eine Oberflächenebenheit von etwa 3 cm. Mit dem Verfahren kann unbewehrter und bewehrter Beton hergestellt werden [Küh1].

10.5.3 Unterwasser-Injektionsbeton

Der *Unterwasser-Injektionsbeton* wird im Allgemeinen auch als *Ausgussbeton* bezeichnet. Dabei wird zunächst nur die grobe Gesteinskörnung anstelle des Betons durch Schüttung eingebaut, und dann werden deren Hohlräume durch einen besonderen Zementmörtel in aufsteigendem Strom, meist durch Verpressen mit Hilfe von Injektionsrohren ausgefüllt. Es sind Betone mit Ausfallkörnungen, bei denen nur der Mörtelanteil, d. h. nur etwa 40 % des Betons den Mischer durchläuft. Im Bereich des Unterwasser-Injektionsbetons werden im Wesentlichen die beiden Verfahren *Prepact* und *Colcrete* unterschieden.

Bei der Zusammensetzung der Mörtel [ACI1] für die Injektionsverfahren *Prepact* und *Colcrete* gilt, wie für Beton für Unterwasserschüttungen, dass die Mörtel gut zusammenhängend sein müssen und sich nur schwer mit Wasser vermischen dürfen. Sie müssen außerdem so fließfähig sein, dass sie im Korngerüst weitgehend einen geschlossen ansteigenden Flüssigkeitsspiegel bilden.

Das Vorbeiströmen des Mörtels an mit Wasser umhüllten Gesteinskörnern fördert die Vermischung mit Wasser. Der Wasserzementwert des Mörtels muss deshalb niedriger sein als beim fertig eingebrachten Beton. Er sollte zur Herstellung wasser- und durchlässiger Bauteile durch Unterwasserinjektion zwischen 0,45 und 0,55 gewählt werden.

Während man beim *Prepact*-Verfahren Zement, Sand und Wasser sowie ein verflüssigendes und treibendes Zusatzmittel verwendet und diese Stoffe gemeinsam mischt, wird beim *Colcrete*-Verfahren meist auf Zusatzmittel verzichtet. Die Mischung der Bestandteile für den *Colcrete*-Mörtel erfolgt in einem speziellen hochtourigen 2-Stufen-Mischer, wobei in der ersten Stufe Zement und Wasser gemischt (Zementleim) und in der zweiten

Stufe durch Hinzufügen des Sands der Mörtel hergestellt wird. Mit diesem Verfahren lässt sich eine sehr intensive Benetzung des Zements mit Wasser erreichen, was zur Stabilität des Gemisches beiträgt.

Die für die Mörtel des Prepakt- und Colcreteverfahrens verwendeten Sande haben in der Regel stetige Sieblinien mit einem Größtkorn von 2 mm (Prepaktverfahren) bzw. von 2 bis 4 mm (Colcreteverfahren). Das Größtkorn des Sands muss ohne Behinderung durch die Zwickel des zu injizierenden Schottergerüsts hindurchgehen. Es darf deshalb nicht größer sein als etwa ein Zehntel des Kleinstkorns im Grobkorngerüst. Das Grobkorn sollte möglichst rundkörnig sein. Die verwendeten Korndurchmesser sind in der Regel größer als 32 mm. Durch geschickte Auswahl von Kies (Schotter) und großen Steinen lässt sich der Hohlraum im Grobkorngerüst klein halten. Er beträgt in der Regel 35 bis 45 Vol.-%.

Das Mischungsverhältnis Zement zu Sand beträgt für Unterwasserarbeiten bei beiden Verfahren 1:1 bis 1:2 Gewichtsteile.

Unter Einbezug des Grobkorngerüsts erhält man für die Injektionsverfahren Prepakt und Colcrete im fertigen Unterwasserbeton einen Zementgehalt zwischen 280 und 350 kg/m³.

Die Einbringverfahren Prepakt und Colcrete (**Bild II.10.5-3**) ähneln einander sehr und können daher gemeinsam beschrieben werden.

Die *Injektionsverfahren* zur Herstellung von Unterwasserbeton erfordern eine von Schlamm freie Baugrubensohle, die einerseits relativ dicht sein muss (kein grober einkörniger Kies), andererseits jedoch nicht aus bindigem Boden (Ton, Lehm) bestehen darf. Im ersten Fall würde der Injektionsmörtel unkontrolliert nach unten absinken, im zweiten Fall würde der bindige Boden von unten in das Kies- oder Schottergerüst eindringen, das in der

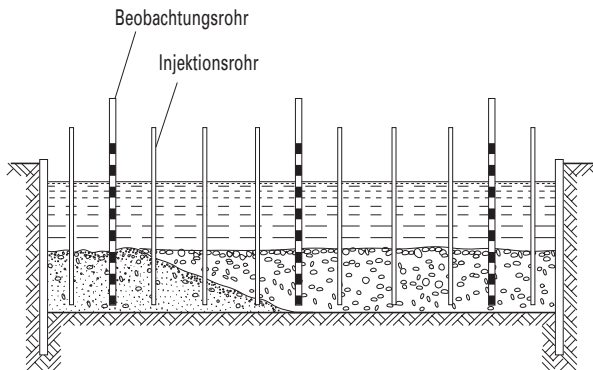


Bild II.10.5-3: Unterwasserinjektion eines Grobkorngerüsts – Prinzipskizze bei fortschreitender Injektion in einer lang gestreckten Baugrube

gewünschten Schütthöhe auf die Baugrubensohle aufgebracht wird.

Nach dem Einbau des Gesteinsgerüsts werden Injektionsrohre in regelmäßigen Abständen eingetrieben. Ihr Durchmesser beträgt bis zu 40 mm, ihr gegenseitiger Abstand je nach Gesteinsgerüst in der Regel 1,5 bis 3 m. Die Rohre sind über Wasser mit einem Schlauchsystem verbunden und können, über entsprechend angeordnete Ventile, einzeln oder in Gruppen mit dem Mörtel beschickt werden. Sie werden mit steigendem Mörtelspiegel aufgezogen, müssen jedoch stets mindestens 30 cm im Mörtel gefüllten Grobkorngerüst stecken.

Der Anstieg des Mörtelspiegels und damit auch die Eintauchtiefe der Injektionsrohre werden mit Hilfe von Beobachtungsrohren (Durchmesser 50 mm) überprüft, die wie die Injektions-

rohre in regelmäßigen Abständen in das Grobkorngerüst eingetrieben wurden. Man verwendet in der Regel ein Beobachtungsrohr auf drei bis sechs Injektionsrohre.

Schlitze entlang der Mantellinien lassen den Mörtel in jeder Höhe in die Beobachtungsrohre eindringen. Der erreichte Pegelstand des Mörtels wird mit Schwimmkörpern oder elektrisch arbeitenden Messverfahren ermittelt. Die Injektionsrohre werden so beschickt, dass man entweder einen möglichst gleichmäßig ansteigenden Mörtelspiegel in der gesamten Baugrube erhält oder dass man von einem Ende der Baugrube den Mörtel in voller Einbauhöhe in natürlicher Böschung vortreibt. Diese Auswahl erfolgt entsprechend den Baugrubenabmessungen und der Leistungsfähigkeit der Misch- und Pumpanlage.

Weist der herzustellende Betonkörper auch eine Oberschalung auf, so werden an den höchsten Stellen Rohre angebracht, durch die das Wasser über dem ansteigenden Mörtel entweichen kann.

10.6 Vakuumbeton

Vakuumbeton wird besonders dort angewandt, wo es um verschleißfeste und widerstandsfähige waagerechte bis schwachgeneigte Oberflächen geht, wie beispielsweise für die Herstellung von Industriefußböden, Parkdecks, Rollschuhbahnen [Bre4, Zan1, Bru2].

Mit dem Vakuumverfahren wird dem in üblicher Weise eingebauten und zum Beispiel mit einer Rüttelbohle abgezogenen Beton nach dem Einbau ein Teil seines Wassergehalts entzogen. Dies erfolgt durch Absaugen mit einer Vakuumpumpe und einer mit einem Filtertuch versehenen Vakuumschalung oder Vakuummatte bzw. Vakuumteppich. **Bild II.10.6-1** zeigt eine schematische Darstellung der Vakuumbehandlung. Das Verfahren ermöglicht das frühe Ausschalen der Bauteile, vermindert das

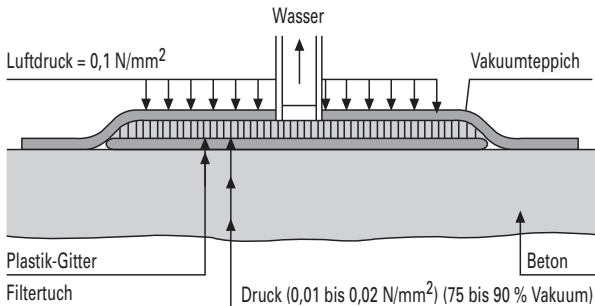


Bild II.10.6-1: Schematische Darstellung der Herstellung von Vakuumbeton

Schwinden und verbessert die Festigkeit, Wasserundurchlässigkeit und Witterungsbeständigkeit des Betons an den Bauteiloberflächen [Fre1, Ger3, Zan2].

In der Regel sollte ein plastischer bis weicher Beton mit einem Ausbreitmaß von $42 \pm 3 \text{ cm}$ eingesetzt werden. Die Sieblinie der Gesteinskörnung sollte im günstigen Bereich möglichst nahe der Sieblinie A liegen. Um den Entzug des Wassers zu erleichtern, sollte der Mehlkorngelinhalt des Betons auf den kleinstmöglichen Wert begrenzt werden. Dadurch soll eine möglichst große Tiefenwirkung der Vakuumbehandlung erreicht und die notwendige Dauer gering gehalten werden. Der Einsatz von mehlfeinen Betonzusatzstoffen kann die notwendige Dauer der Vakuumbehandlung verlängern. Mit der Vakuumbehandlung sollte sofort nach dem Abziehen mit der Rüttelbohle begonnen werden. Die Behandlungsdauer beträgt ein bis zwei Minuten je Zentimeter Deckendicke. Die Tiefenwirkung ist auf 10 bis 20 cm begrenzt.

Durch das Absaugen wird der Wasserzementwert vermindert. Es entsteht eine dichtere, wasserärmere Packung der festen Betonbestandteile, die zu einer hohen Grünstandfestigkeit des Betons führt [Wes1]. Die Bauteile verlieren dabei auf 20 cm rund 1 cm an Höhe. Dickere Bauteile können die Grünstandfestigkeit beim Betreten wieder verlieren, wenn Wasser kapillar nachgesaugt werden kann. Betone, die planmäßig, auch über größere Dicke, einen Wasserzementwert $\leq 0,50$ und einen hohen Mehlkorngehalt aufweisen, lassen sich oft nur schwer vakuumieren. Da durch die Vakuumbehandlung der Gehalt an Mikroluftporen, die in Luftporenbeton durch LP-Mittel eingeführt werden, etwas abnehmen kann, sollte der Luftgehalt gegenüber dem Sollwert um etwa 1 Vol.-% erhöht werden.

Nach Abschluss der Vakuumbehandlung ist die Betonoberfläche maschinell abzuschleifen.

Damit das im Beton nach der Vakuumbehandlung verbliebene Wasser für die Hydratation des Zements nicht verdunstet, sollte eine sofortige Nachbehandlung erfolgen. Ansonsten gelten die allgemeinen Regeln für die Nachbehandlung und den Schutz des Vakuumbetons.

10.7 Sichtbeton

Unter „*Sichtbeton*“ werden im Allgemeinen Betonflächen verstanden, die für den Betrachter als Oberfläche sichtbar bleiben und an die hinsichtlich des Aussehens besondere Anforderungen gestellt werden. Es bestehen keine spezifischen Vorschriften zum Entwurf, zur Betonzusammensetzung, zur Bauausführung oder zur Beurteilung von Sichtbetonflächen.

Im Wesentlichen unterscheidet man bei der Herstellung von Sichtbetonflächen zwischen den Oberflächen, bei denen die Schalhaut als Gestaltungselement benutzt wird, und Betonflächen, die

nachträglich bearbeitet werden. In beiden Fällen kann die Farbe als weiteres gestalterisches Merkmal eingesetzt werden, z. B. durch die Verwendung von Zement mit besonderer Farbwirkung, durch den Einsatz von *Pigmenten* und die Wahl besonderer Gesteinskörnungen. Signifikante Beispiele für Zemente, die aufgrund spezieller Herstellmethoden eine besondere Eigenfarbe aufweisen, sind Weißzemente, die im Wesentlichen ihre weiße Farbe durch die Verwendung von eisenoxidfreiem Klinker erhalten, und Portlandschieferzement mit rot-brauner Eigenfarbe, der unter dem Handelsnamen Terrament vertrieben wird. In DIN 18217 „Betonflächen und Schalungshaut“ werden die Zusammenhänge von *Betonoberfläche*, *Schalung* und Bearbeitung erläutert und begrifflich definiert. DIN 18500 „*Betonwerkstein*“ enthält die verschiedenen Bearbeitungsarten, wie beispielsweise Waschen, Spitzen, Scharrieren, Sandstrahlen, Schleifen, mit denen Betonoberflächen besonders gestaltet werden können.

Da die Ausführung von Sichtbeton nicht nach definierten technischen und vertraglichen Regeln erfolgen kann und ästhetische Gesichtspunkte bei der Beurteilung zu berücksichtigen sind, kann es in der Baupraxis leicht zu unterschiedlichen Auffassungen zwischen den Vertragspartnern über das Aussehen und die Akzeptanz von Sichtbetonflächen kommen. Solche Schwierigkeiten lassen sich weitgehend vermeiden, wenn die Bauleistung auf der Basis von Musterflächen vereinbart und die Merkblätter „Sichtbeton“ [Me18] und „Sichtbetonflächen von Fertigteilen“ [Me94] beachtet werden. Darin sind konkrete Empfehlungen zu Planung und Ausschreibung, Herstellung und Beurteilung von Sichtbetonflächen zusammengefasst. Darüber hinaus geben die Hinweise in den Veröffentlichungen [Trü1, Sch15, Ebe1] der Praxis Hilfestellung zu der Ausführung von Sichtbeton.