

Der Begriff „Unterwasserbeton“ beschreibt sowohl das Einbauverfahren als auch die betontechnologischen Anforderungen an die Zusammensetzung des Betons. Verfahrensbedingt ist die große Herausforderung der Betoniervorgang selbst, der im Wesentlichen ohne Sicht auf die Einbausituation erfolgt. Deshalb sind eine gute Planung und Arbeitsvorbereitung wesentlich für das Gelingen des Betonierens unter Wasser. Unterwasserbeton bietet sich vor allem dort an, wo die Trockenlegung von Baugruben aus technischer oder wirtschaftlicher Sicht unvorteilhaft ist. Anspruchsvolle Unterwasserbetone sollten von erfahrenen Firmen eingebaut werden. In einem weiteren Zement-Merkblatt B 15 [1] werden die hier nicht behandelten Verklammerungsmörtel und -betone sowie Ausguss- bzw. Injektionsbetone behandelt.

■ 1 Planungsgrundlagen und Vorarbeiten

1.1 Allgemeines

Das Herstellen von Unterwasserbetonbauteilen setzt eine gründliche Planung und Arbeitsvorbereitung voraus. Dies ist nicht nur in technischer Hinsicht erforderlich, sondern auch bauvertraglich in der VOB/C, DIN 18331, Abschnitt 0.2.3 [2], verankert. Unterwasserbeton gilt demnach als „Beton besonderer Fertigung“.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Fragestellungen, die planerisch vor Baubeginn zu klären sind.

Auch für Unterwasserbeton ist stets eine Einordnung in Expositionsclassen erforderlich [3], also auch bei nur temporär erforderlichen Unterwasserbetonbauteilen (siehe 2.5.3).

Darüber hinaus gilt der normative Grundsatz, dass das Betonieren unter Wasser mit der geeigneten Ausrüstung und unter Anwendung von Verfahren durchzuführen ist, die sicherstellen, dass die Anforderungen aus den bautechnischen Unterlagen eingehalten werden. Diese müssen auf das Betonierverfahren abgestimmt sein [4].



Bilder: A. Weisner

Bilder 1 und 2: Unterwasserbetonage beim Bau der Schleuse Zerben

Anforderungen an die Dichtigkeit werden in der Praxis häufig über eine zulässige Leckwasserrate vereinbart. Dabei wird in der Regel die gesamte Baugrube (Unterwasserbetonsohle und benetzte Baugrubenumschließung) erfasst. Erfahrungs-

Tabelle 1: Checkliste für Planung und Arbeitsvorbereitung beim Herstellen von Unterwasserbetonbauteilen

<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; width: fit-content;">Baufgabe</div>	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; width: fit-content;">Tragwerk</div>	<p>Checkliste für die Planung von Unterwasserbeton</p> <ul style="list-style-type: none"> – tragend oder nicht tragend – Auftriebsnachweis/Vorgaben für Wichte bzw. Dichte – bewehrt, unbewehrt, teilbewehrt, stahlfaserbewehrt – verankert oder unverankert – zulässige Toleranz Unterwasserbeton und ggf. der Ankerlage – monolithisch oder mit Arbeitsfugen – bei Arbeitsfugen – Dichtungskonzept/Nachdichtung (z. B. Injizieren) – Baubehelf oder Dauerfunktion – geometrische Randbedingungen – Dichtigkeits- bzw. Durchlässigkeitsanforderungen – Anschlüsse an Wände, Baugrubenumschließung und andere Bauteile – Expositions- und Feuchtigkeitsklassen – Einbautechnologie/Betonierverfahren – Vor- und Nacharbeiten – objektspezifische Besonderheiten
	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; width: fit-content;">Konstruktion</div>	
	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; width: fit-content;">Betontechnologie</div>	
	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; width: fit-content;">Bauverfahren</div>	

gemäß sind Leckwasserraten bei Druckwasserhöhen (Δh) von 4 m bis 15 m $\leq 1,5$ l/s je 1 000 m² Fläche üblich.

Andere Veröffentlichungen schlagen als Anhaltswerte vor, dass bei Druckwasserhöhen bis 4 m Leckwassermengen bis 1 l/s je 1 000 m² benetzter Fläche und bei tieferen Baugruben (bis 20 m Druckwasserhöhe) auch Werte bis 5 l/s je 1 000 m² möglich sind [5].

Das Wasserhaltungskonzept sollte von einem Fachbetrieb erstellt und mit dem zuständigen Planer und Baugrundgutachter abgestimmt sein. Dabei spielen nicht nur die Leistung, die Dokumentation, sondern vor allem das Vorgehen beim Lenzen der Baugrube und der Umgang bei unplanmäßiger Durchlässigkeit eine Rolle.

Das Lenzen der Baugrube sollte in Phasen erfolgen. Ein schlagartiges Lenzen ist in der Regel nicht empfehlenswert. Das Lenzkonzept ist auf das Tragwerk, den Baugrund, die Baugrubenwand, benachbarte Bauten und die Betonfestigkeit zum Lenzeitpunkt des Unterwasserbetons abzustimmen.

Die Toleranzen für die Sollhöhe der Oberkante von Unterwasserbetonen liegen üblicherweise bei 10 cm. Auch 5 cm sind je nach Einbaugerät und Betontechnologie möglich. Der Umgang mit Unter- oder Überschreitungen sollte nicht nur im Bauvertrag geregelt sein, sondern auch mit dem Tragwerksplaner abgestimmt werden. So können zum Beispiel Unterschreitungen im Hinblick auf wirkende Auftriebskräfte zu einer statischen Überlastung von Unterwasserbetonsohlen oder bei verankerten Sohlen auch zur Überlastung der Anker führen. Bei Bauvorhaben nach ZTV-ING ist unabhängig hiervon im Bereich zwischen planmäßiger Aushubsohle und der Soll-Unterfläche des Unterwasserbetons für herstellungsbedingte Ungenauigkeiten ein Maß von 30 cm zu berücksichtigen bzw. zu kalkulieren [6, D1].

1.2 Vorbereitende und begleitende Leistungen bei Unterwasserbetonen

1.2.1 Taucherarbeiten und Reinigungsarbeiten

Bei üblichen Anwendungen werden die Arbeiten von einem oder mehreren Tauchern vor und während des gesamten Betoneinbaus begleitet bzw. durchgeführt. Die Sichtverhältnisse sind während des Betoniervorganges in der Regel schlecht. Oft muss der Taucher „blind“ arbeiten. Daher sind erfahrene Industrietaucher maßgeblich für das Gelingen der Unterwasserbauteile. Die Arbeiten müssen im Hinblick auf die Arbeitssicherheit abgestimmt sein. Grundsätzlich wird empfohlen, Taucherleistungen für die Reinigungsarbeiten, Kontrollzwecke und das Herstellen des Unterwasserbetons gesondert auszuschreiben oder in die Leistungsposition für das Herstellen des Unterwasserbetons mit einzukalkulieren. Folgende Arbeiten sollten geplant und wenn erforderlich ausgeschrieben werden:

Vor der Betonage:

- Kontrolle auf Schlosssprengung bei Spundwänden einschließlich Dokumentation der Fehlstellen (Protokolle, Fotos, Filme)
- bei hohen Dichtigkeits- oder Verbundanforderungen Verpressschlauchsysteme an Baugrubenwänden und Anschlussbauteilen montieren
- Baugrubensohle reinigen (i. d. R. Grob- und Feinreinigung mit Bagger)

- Wände im Anschlussbereich der Sohle, Anker und Pfähle im Bereich der Unterwasserbetonsohle reinigen (z. B. mit Hochdruckwasserstrahlen)
- Bei bewehrten Unterwasserbetonen ggf. Bewehrung reinigen (insbesondere untere Lagen)
- Absaugen von Sedimenten im Bereich der Unterwasserbetonsohle (Sauggerät)

Während des Betonierens:

- Schlamm absaugen (Schlammwalze vor der Betonierfront)

Nach den Betonarbeiten:

- Reinigen der Wände während und nach dem Lenzen (z. B. mechanisch oder mit Hochdruckwasserstrahlgeräten) – vorteilhaft für die nachfolgenden Gewerke
- Sohle reinigen nach dem Lenzen
- Verankerungsköpfe reinigen
- Bauwerksanschlüsse reinigen und kontrollieren

Während des Betoniervorganges selbst sind vorauslaufend vor der Betonierfront nochmals sedimentierte Bodenbestandteile („Schlammwalze“) mit Saugpumpen zu entfernen. Beim Einbau des Betons ist darauf zu achten, dass der aus dem Schüttrohr austretende Beton den zuvor eingebrachten derart verdrängt, dass der Beton nicht mit dem Wasser in Berührung kommt. Nur so ist zu vermeiden, dass Zementleim ausgewaschen wird und Trennschichten entstehen. Während des Betoniervorganges ist so viel Wasser aus der Baugrube abzupumpen, wie Beton eingebaut wurde, sodass der Wasserspiegel während des Betonierens nahezu konstant bleibt und somit Druckdifferenzen, die zu Ausspülungen oder Erosionen des frischen Unterwasserbetons führen können, vermieden werden [7].

1.2.2 Neutralisierung

In der Regel wird eine Neutralisierung des Baugrubenwassers erforderlich, bevor das Lenzwasser aus der Baugrube in einen Vorfluter geleitet wird. Dafür ist eine behördliche Einleitungsgenehmigung erforderlich. Hierzu sind Absetzbecken und eine Neutralisierungsanlage erforderlich. Insbesondere der pH-Wert, der eingestellt werden soll, bedarf der vorherigen Abstimmung mit den zuständigen Behörden.

1.2.3 Sonstiges

Da das Aushubmaterial häufig nicht ohne weiteres wiederverwendet werden kann, sollte im Vorfeld eine Baggergutuntersuchung ausgeschrieben werden und eine Schlamm- und Baggergutentsorgung bzw. -verwertung vorvertraglich geregelt werden. Für die Optimierung des Bauablaufs und zur Entwässerung der Massen sind geeignete Schlammabsetzbecken ratsam.

Für den Fall nicht tolerierbarer Undichtigkeiten ist eine Rissverpressung vor oder nach dem Lenzen zu erwägen.

1.3 Bewehrter Unterwasserbeton

1.3.1 Stab- und mattenbewehrte Betone

Stab- oder Mattenbewehrung sollte in einem Unterwasserbeton nur dann in Betracht gezogen werden, wenn dies aus statischen Gründen unabwendbar ist. Dies kann z. B. der Fall sein, wenn der Unterwasserbeton dauerhaft tragend ist und nicht nur temporär der Auftriebssicherheit dient.

Die Lagesicherung der Bewehrung, die Sicherstellung der Überdeckungsmaße, der Einbau des Betons, die Fließbehinderung des Betons, die Gefahr von Verbundstörungen mit der Bewehrung insbesondere in den unteren Lagen, das schwierige Umsetzen des Einbaurohres/Einbauschlauches, das Reinigen der Sohle von Schlamm während der Betonage und die Arbeitssicherheit sind die wesentlichen Herausforderungen für die Planung und die Bauausführung.

Es ist daher sinnvoll, nach Möglichkeiten zu suchen, um den Bewehrungsgrad zu verringern. Es kommen in Betracht:

- Verankerung der Unterwasserbetonsohle
- Erhöhung der Pfahl- bzw. Ankeranzahl
- Erhöhung der Bauteildicke
- Vorspannen der Anker
- Einsatz von Stahlfaserbeton

Ist eine flächenhafte Stab- oder Mattenbewehrung aus statischen Gründen nicht verzichtbar, sind folgende Planungsgrundsätze empfehlenswert:

- Bewehrung ist an Land bzw. im Werk vorzufertigen und sollte möglichst in großen Körben abgesetzt werden.
- Das Binden der Bewehrung unter Wasser ist zu vermeiden oder auf ein Minimum zu beschränken.
- Sicherung der Bewehrungslage durch Verankerungen oder Aufhängungen z. B. an der Baugrubenwand.
- Betonieröffnungen möglichst in Form von ausreichend breiten Gassen ausführen. Auch das Aufschwimmen des Molches (Bild 4) muss gewährleistet sein.
- Betoniergassen sollten so angeordnet werden, dass möglichst wenig umgesetzt werden muss.
- Die Betoniergassen sollten auch über Wasser zur Orientierung für den Taucher erkennbar sein (z. B. durch Verlängerung mit senkrechten Bewehrungsstäben).

1.3.2 Stahlfaserbewehrte Betone

Stahlfaserbewehrte Unterwasserbetone können bei besonderen Anforderungen erwogen werden.

Durch Stahlfasern können im gerissenen Beton, ähnlich wie beim Stahlbeton, Zugkräfte über den Riss hinweg übertragen werden. Diese Eigenschaft kann im Grenzzustand der Tragfähigkeit und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit genutzt werden. Der Zugwiderstand nimmt jedoch in der Regel mit größer werdender Verformung ab; d.h. die Last-Verformungs-Kurve weist nach der Rissbildung einen abfallenden Ast auf [8].

Die Betondruckfestigkeitsklasse ist begrenzt auf $\leq C50/60$.

Verfahren nach der Plastizitätstheorie dürfen bei Stahlfaserbetonbauteilen grundsätzlich angewendet werden, wenn die überwiegende Zugtragwirkung durch Betonstahl erzielt wird. Bei rückverankerten Unterwasserbetonsohlen kann jedoch das Verfahren der Plastizitätstheorie nach EC 2 [9] wie z. B. auch für elastische gebettete Bauteile angewandt werden [8]. Das DBV-Merkblatt „Industrieböden aus Stahlfaserbeton“ [10] deckt das Einsatzgebiet von Unterwasserbetonen nicht ab.

Der Einsatz von Stahlfasern im Unterwasserbeton kann das Rissverhalten (Anzahl, Rissverteilung, Rissbreiten) verbessern.

Somit kann es bei höheren Anforderungen auch sinnvoll sein Stahlfasern konstruktiv einzusetzen.

Ihr Einsatz ist mit einem höheren Aufwand bei den Erstprüfungen verbunden. Die Stahlfasern erhöhen zunächst den Wasseranspruch. Hier muss durch Anpassung der Betonzusammensetzung und mit Hilfe von Betonzusatzmitteln die Pumpbarkeit, das Fließverhalten und die Entmischungssensibilität eingestellt werden.

Der Gehalt an Fasern muss den statischen Anforderungen entsprechen, sollte jedoch möglichst geringgehalten werden. Dabei sind 30 kg/m³ bis 35 kg/m³ als Obergrenze üblich. Es wurden aber auch schon Sohlen, z. B. am Potsdamer Platz in Berlin, mit 40 kg/m³ ausgeführt [11]. Die Vermeidung von „Igelbildung“ beim Pumpen des Betons und die Selbstnivellierung der Oberfläche im Rahmen der Toleranzen muss sichergestellt werden.

Üblicherweise dienen Unterwasserbetonsohlen als Baubehelf. In Deutschland gibt es nur einzelne Beispiele, in denen stahlfaserbewehrter Unterwasserbeton ohne Stabstahlergänzung als tragende und dichtende WU-Konstruktion dient [12]. Die Zusammensetzung war hier wie folgt:

- 310 kg/m³ CEM III/B 32,5 N – LH/SR (na)
- 120 kg/m³ Flugasche
- 175 kg/m³ Wasser
- 1708 kg/m³ Gesteinskörnung mit Größtkorn 32 mm
- PCE-Fließmittel in Kombination mit organischem Stabilisierer
- Konsistenz F5
- 35 kg/m³ Stahlfasern mit glatter Oberfläche und Endhaken

Bei stahlfaserbewehrten Unterwasserbetonen sollte ein Fachplaner mit erweiterten betontechnologischen Kenntnissen und der Tragwerkplaner beteiligt werden. Für die Bauausführung ist ein erweitertes Qualitätsmanagement empfehlenswert.

1.4 Verankerungen

Verankerungen zur Auftriebssicherung sind kraftschlüssig und dicht in den Unterwasserbeton einzubinden. Dies stellt hohe Anforderungen an die Betontechnologie, Betoneinbau und deren Vorbereitung, wie z. B. die Reinigung der Anker- bzw. Pfahlbereiche. Das Reinigen durch Absaugen ist auch während der Anker- und Pfahlarbeiten sinnvoll. Damit sollen, insbesondere bei hoher Anker- oder Pfahlanzahl, unnötige Ablagerungen aus dem Gemisch von Sedimenten mit dem Material aus der Anker- und Pfahlverpressung vermieden werden.

Zusätzliche Bewehrung im Bereich der Anker- oder Pfahlköpfe kann erforderlich werden. Die Kriterien hierfür sind in den bauaufsichtlichen Zulassungen der Anker und Pfähle beschrieben. Dort finden sich auch Vorgaben zur Art und Anordnung der Bewehrung wie auch zur Mindestdruckfestigkeit des Betons (häufig C20/25).

Hinsichtlich des maximalen Pfahl- oder Ankerabstands wird ein Raster von 3,50 m x 3,50 m empfohlen [13]. Je größer die Abstände gewählt werden, umso günstiger wird die Betonierbarkeit.

Die Auftriebskräfte einer unbewehrten Unterwasserbetonsohle werden über das innere Druckgewölbe der Sohlen zu den Ankern oder Pfählen und/oder der Baugrubenwand weiterge-

leitet. Solche Unterwasserbetone können als „Tragwerke aus unbewehrtem oder gering bewehrtem Beton“ im Sinne des Eurocode 2, Abschnitt 12.1, angesehen werden [9].

Die Planung der Verankerung sollte zwischen Tragwerksplaner, Baugrundsachverständigen und Objektplaner im Vorfeld abgestimmt werden. Dabei sollten auch die Anker- bzw. Pfahlprüfungen, die Betonierbarkeit im Verankerungsbereich und der Korrosionsschutz näher betrachtet werden.

1.5 Einbauverfahren und Bauausführung

Bei den Einbauverfahren für Unterwasserbeton wird grundsätzlich unterschieden,

- ob ein fertiggemischter Beton (in der Regel Transportbeton) an der Einbaustelle unter Wasser eingebaut wird (siehe Abschnitte 2 und 3) oder
- ob erst durch das Füllen von Hohlräumen grober Gesteinskörnung mit Mörtel ein Beton unter Wasser vor Ort entsteht (siehe Zement-Merkblatt B 15 [1]).

Neben den im folgenden beschriebenen Verfahren werden in der Literatur auch Verfahren von untergeordneter Bedeutung beschrieben oder solche, die kaum mehr angewendet werden und eher unter historischen Gesichtspunkten Erwähnung finden. Hierzu gehören beispielhaft das Hydroventil-Verfahren und das Kübelverfahren. Unter www.beton.wiki [14] werden diese Verfahren kurz erläutert [D2, D3]. Ausführlicher sind diese beschrieben in [15].

Während der Unterwasserbetonarbeiten sollten bestenfalls keine oder nur eine sehr geringe Fließbewegung des Wassers und kaum Schwankungen des Wasserstands zugelassen werden. Der Wasserstand sollte während der Betonage durch Abpumpen nahezu konstant gehalten werden.

Der Einbau erfolgt im Regelfall einlagig. Die Betonage beginnt an einem Eckpunkt oder an einer Seite und soll optimalerweise nicht unterbrochen werden.

Neigungen von Unterwasserbetonsohlen, die steiler als 1:10 sind, können erfahrungsgemäß nicht sicher hergestellt werden.

■ 2 Unter Wasser geschütteter Transportbeton

2.1 Contractor-Verfahren – Allgemeines

Unter dem Begriff Contractor-Verfahren werden in diesem Merkblatt jene Verfahren zusammengefasst, bei denen im Schutz von Rohrleitungen, Schläuchen und dergleichen der Transportbeton zur Einbaustelle unter Wasser transportiert wird. In früheren Ausgaben dieses Merkblatts wurde unter dem Begriff „Contractorbeton“ nur der „Einbau mit Trichter“ („Ursprüngliches Contractor-Verfahren“) beschrieben. Hier werden nun die weiterentwickelten Verfahren (Pumpverfahren, Hop-Dobber-Verfahren) auch den Contractor-Verfahren zugeordnet.

Weil der Beton bei diesen Verfahren in die eingebaute Betonschicht hineinbetoniert wird, bzw. beim Hop-Dobber-Verfahren im Schutz eines Schilds an den vorhandenen Beton anbetoniert wird, tritt an der Einbaustelle keine Qualitätseinbuße durch Entmischung während der Betonage ein.

Nur bei Betonierbeginn kann es zu geringfügigem Auswaschen bzw. Entmischungen kommen. Damit der Beton beim Start der Arbeiten im Rohr nicht mit Wasser in Berührung kommt, wird vorher ein so genannter Molch (Gummi- oder Schaumstoffball) in das Rohr gesteckt. Wenn der Betonvorrat im Trichter und Rohr ausreicht, um nahezu das ganze Schüttrohr zu füllen, wird der Molch durch den Betondruck aus dem Rohrende ausgetrieben. Entweder schwimmt der Molch dann auf oder er ist am Rohr fixiert.

Durch vorsichtiges Anheben zum Start der Betonierarbeiten kann der Beton aus dem Rohr an der Baugrubensohle oder auch auf anderen Unterbauten austreten. Um den freien Fall durchs Wasser zu begrenzen, sollte der Abstand zur Sohle so gering wie möglich sein. Der maximale Abstand zur Sohle sollte auf 20 cm bis maximal Rohrdurchmesser des Contractorrohrs begrenzt werden [16, D4]. Beim Hop-Dobber-Verfahren empfiehlt die Literatur noch geringere Werte (siehe Abschnitt 2.4).

Anschließend sollte die Eintauchtiefe des Schüttrohrs im schon eingebrachten Beton möglichst groß sein und bei dicken Unterwasserbetonsohlen rund 80 cm, besser 1 m betragen. Die Untergrenze liegt unter günstigen Randbedingungen bei 60 cm [17]. Das heißt, geringere Dicken von Unterwasserbetonteilen als 60 cm sind mit den Contractor-Verfahren nicht sicher ausführbar. Nach ZTV-ING beträgt die Mindeststärke für unbewehrte Unterwasserbetonsohlen 1,0 m [6, D1].

Im Gegensatz dazu gleitet („surft“) beim Hop-Dobber-Verfahren das Einbauschild auf der bereits betonierten Betonschicht (siehe Abschnitt 2.4). Die oben genannten Mindestbauteilstärken sind jedoch auch hier ratsam.

Grundsätzlich können die nachfolgend beschriebenen Contractor-Verfahren auch kombiniert bzw. in „Mischform“ angewandt werden. So z. B., dass der Schwimmer beim Hob-Dobber-Verfahren nicht von einer schienengeführten, verfahrbaren Traverse mit Einbringtrichter aus beschickt wird, sondern über Pumpen, die das Schüttrohr des Dobbers direkt mit Pumpbeton befüllen.

2.2 Einbau mit Trichter

Bei diesem 1911 erstmals durch die schwedische Bauunternehmung Contractor angewendeten Verfahren wird Beton durch senkrechte Rohre (Bilder 3 und 4) geschüttet (ursprüngliches Contractor-Verfahren).

Die Einbaurohre haben in der Regel einen kreisförmigen Querschnitt mit einem Innendurchmesser von 150 mm bis 300 mm. Häufig wird ein Durchmesser von 250 mm verwendet [16, D4]. Die Contractor-Rohre müssen aus Stahl gefertigt sein, da Aluminium mit Beton reagieren kann.

Es gibt drei Rohrsysteme: das starre Rohr, das gegliederte Rohr, das beim Hochziehen jeweils um ein Glied gekürzt wird, sowie das Teleskoprohr, dessen Rohrteile ineinandergeschoben werden [15]. Im Allgemeinen sind die vorgenannten Schüttrohre an einer Übergabekonstruktion mit Trichter oder Einfüllrohr aufgehängt oder auch verbunden.

Das Verfahren eignet sich – insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen – für kleinere Baumaßnahmen und das Betonieren von vertikalen Bauteilen.



Bild 3: Einbau mit Trichter – Contractorrohr am Kranhaken

2.3 Pumpverfahren

Das Pumpverfahren ist eine Variante des ursprünglichen Contractor-Verfahrens, bei der der Beton mit Betonpumpe und Ausleger eingebracht wird (Bild 5). Dieses Verfahren hat sich in der Praxis, zumindest bei größeren Flächen, bewährt und wird in Deutschland am häufigsten angewandt. Die Einbauleistung hängt im Wesentlichen vom Durchmesser des Einbaurohres, der Pumpenleistung und der Bauteil- bzw. Baugrubengeometrie und etwaigen Einbauten ab.

Hinter dem Pumpenarm, am Beginn des Verteilerschlauchs ist ein Quetschventil zu empfehlen, welches beim Versetzen oder Anheben der Rohr- bzw. Schlauchleitung ein Abreißen der Betonsäule verhindern soll (Bild 6). In der Regel folgt ein Schüttrohr, dessen Länge mindestens der Wassertiefe entsprechen muss.

Das Schüttrohr sollte, wie im Abschnitt 2.1 beschrieben, immer in den bereits eingebrachten Beton hineinreichen. Die Höhe des eingebrachten Betons sollte kontrolliert werden, beispielsweise mittels Laser oder manuell mit einem Peilstab mit aufgeschweißter Fußplatte. Anhand des Betonniveaus und des Wasserspiegels kann kontrolliert werden, wie tief das Schüttrohr im Beton steckt.

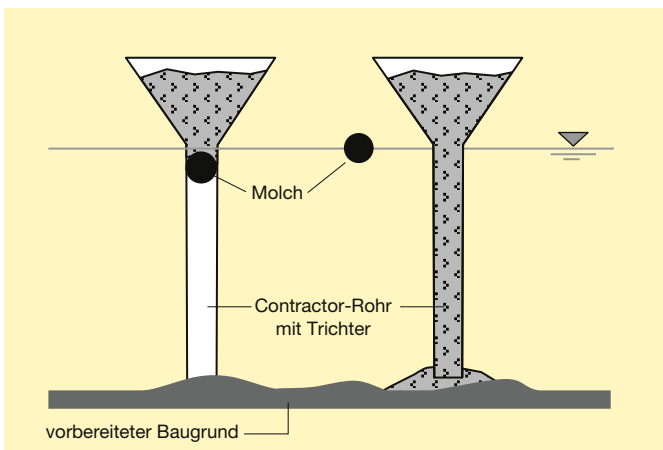


Bild 4: Einbauvorgang beim Betonieren mit dem Trichter und Molch

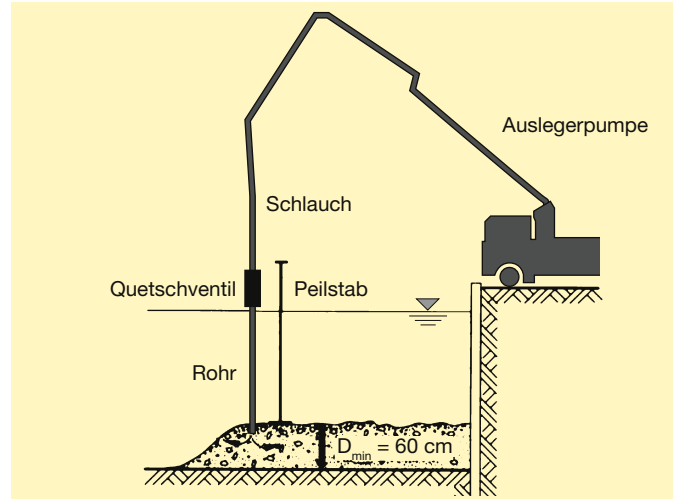


Bild 5: Schematische Darstellung des Pumpverfahrens

Die gewünschten Vertikal- und Horizontalbewegungen des Rohres können mit dem Pumpenausleger durchgeführt werden, wobei die „Feinststeuerung“ in horizontaler Richtung idealerweise von einem begleitenden Boot oder Prahm (Ponton) aus per Hand erfolgt. Das Pumpverfahren kann für die Herstellung von Bauteilen aller Art dienen und ermöglicht eine stetige Betonförderung, wobei hier auch die Mindestdicken nach 2.1 eingehalten werden müssen.

2.4 Hop-Dobber-Verfahren

Eine wesentliche Verbesserung für die Anwendung des Contractor-Verfahrens mit Einbautrichter stellt der Hop-Dobber dar. Dieses Verfahren wurde 1980 vom niederländischen Ingenieur Hop entwickelt. Der Dobber (niederländisch = Schwimmer) besteht aus einem Schüttrohr aus Stahl mit einem am unteren Ende angeflanschten Kragen, welches als Einbauschild dient (Bilder 7 und 8). Der Rohrdurchmesser variiert von Bauvorhaben



Bild 6: Quetschventil zur kontrollierten Regulierung der Betonsäule



Bild 7: Hop-Dobber im Einsatz – Unterwasserbetonage beim Neubau der Schleuse Gleesen

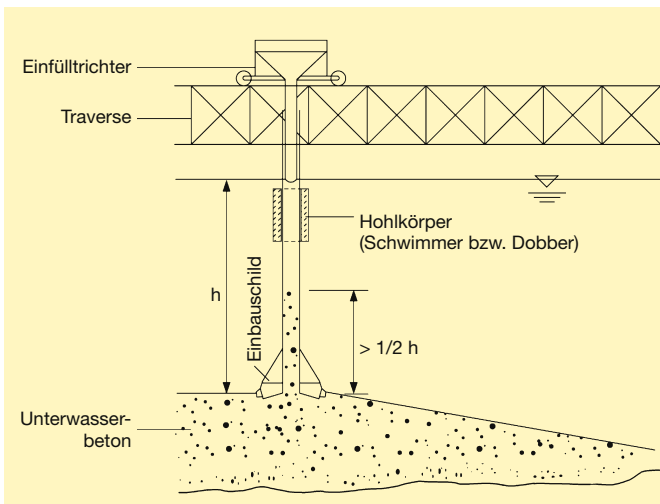


Bild 8: Schema Hop Dobber mit Traverse

zu Bauvorhaben und ist abhängig von der Einbautiefe, dem Größtkorn im Beton und der Einbaugeschwindigkeit. Üblicherweise beträgt er 35 cm. Die Abmessungen des runden oder achteckigen Kragens liegen im Allgemeinen zwischen 110 cm und 165 cm [15].

Durch einen Hohlkörper rings um das Schüttrrohr wird ein Schwimmeffekt erzeugt. Der Hohlkörper ist so dimensioniert, dass ein geringer, abwärts gerichteter Druck vorhanden bleibt. Dadurch verbleibt der Kragen auch beim Verschieben einige Zentimeter in dem bereits eingebauten Beton. Wassereinschlüsse und Betonauspülungen werden vermieden. Aufgrund eines annähernd hydraulischen Gleichgewichts zwischen äußerer

Wassersäule und dem Frischbeton im Schüttrrohr kann der Beton nicht vollständig aus dem Einbauschild entweichen. In der Praxis hat sich daher gezeigt, dass mehr als die Hälfte der Wasserhöhe an Beton im Rohr vorhanden sein muss, damit der Beton am Rohrende sicher austreten kann. Die Eintauchtiefe beim „Surfen“ in den Beton sollte, je nach Betoniergeschwindigkeit und Größe des Einbauschilds, zwischen 8 cm und 40 cm betragen [15].

Der Hop-Dobber wird traditionell von einer Traverse aus gesteuert, die z. B. über Schienen neben der Baugrube verfahrbar ist. An dieser Traverse ist ein Einbringtrichter mit Stahlrohr montiert. Dieses Stahlrohr passt so in das Schüttrrohr des Dobbers, dass dieses sich in der senkrechten Richtung frei bewegen lässt.

Der Hop-Dobber kann auch „frei“ geführt werden. Hierzu werden mit Winden gesteuerte Schwimmstege oder Prahme eingesetzt, die idealerweise über die gesamte Bauteilbreite geführt werden. Sie sind einfacher einzusetzen und geeignet, um den Dobber in die geplante Richtung zu verschieben. Die Führung über Schwimmstege oder Prahm (Bilder 1 und 2) hat sich in der deutschen Baupraxis durchgesetzt.

Zu Beginn des Betonierens wird der Hop-Dobber bis auf etwa 5 cm bis 10 cm über Baugrubensohle oder der unteren Bewehrung positioniert [15].

Wenn das Wasser aus dem Hop-Dobber ausgetrieben ist, schwimmt der Hop-Dobber auf dem Beton. Diese Situation wird beibehalten, bis das endgültige obere Niveau des Bauteils erreicht ist. Dies wird durch Messung (Lotung) oder mittels Farbmarkierung am beweglichen Trichterrohr kontrolliert. Danach werden Einbautrichter und Hop-Dobber entlang der Traverse versetzt oder mittels Schwimmstegwinde bzw. händisch verschoben. Nachdem eine komplette Bauteilbreite betoniert ist, wird die Traverse bzw. der Schwimmsteg verfahren und der nächste Streifen kann betoniert werden. Die Längsverschiebung muss ebenso sorgsam und allmählich erfolgen, sodass das Einbauschild (Kragen) die Betonoberfläche nicht verlässt.

Bei Bauteilen mit einer oberen Bewehrungslage kommt der Hop-Dobber im Regelfall nicht zur Anwendung, da die notwendigen Betoniergassen (breiter als das Einbauschild) einen zu großen Bewehrungsabstand erforderlich machen.

2.5 Anforderungen an Unterwasserbetone für Contractorverfahren

2.5.1 Allgemeines

Unterwasserbeton wird wie üblicher Beton aus hydraulischen Bindemitteln, Gesteinskörnung, Wasser und ggf. aus Betonzusatzstoffen und Betonzusatzmitteln hergestellt.

Der Einbau und die verfahrensbedingten Randbedingungen sind jedoch bei dieser Bauweise besonders. In jedem Fall darf während des Einbaus keine Entmischung stattfinden. Das erfordert neben einer geeigneten Verfahrenstechnik eine hohe Robustheit des Betons.

Unterwasserbetone werden nicht gerüttelt, da sonst unplanmäßig Wasser in den Beton dringt. Er muss – ähnlich wie Vergussbetone oder selbstverdichtende Betone – gut fließfähig und entmischungsstabil sein.

Der Beton muss nach Norm so beschaffen sein, dass er beim Einbringen als zusammenhängende Masse fließt, damit er auch ohne Verdichtung ein geschlossenes Gefüge erhält [18].

Neben einer erweiterten Erstprüfung sollte der Beton im Hinblick auf das Einbauverfahren in einem Verarbeitungsversuch geprüft werden [5].

2.5.2 Ausgangsstoffe und Grenzwerte der Zusammensetzung

Bei der Wahl und Menge der Ausgangsstoffe gibt es normativ nur wenige Vorgaben [18]. Diese sind wie folgt:

- Wassermenge $\leq 0,60$ (bei höherer Anforderung aus der Expositionsklasse z. B. XA auch niedriger)
- Die Zementmenge muss bei Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn von 32 mm $\geq 350 \text{ kg/m}^3$ betragen.
- Bei Verwendung von Flugasche darf der Gehalt an Zement und Flugasche ($z + f$) 350 kg/m^3 nicht unterschreiten. Dies gilt unabhängig vom Größtkorn. Dabei darf der Grenzwert des Zementgehalts (Tabellen F.2.1 und F.2.2, DIN EN 206-1/DIN 1045-2) [18] für die zutreffende Expositionsklasse bei Anrechnung von Zusatzstoffen nicht unterschritten werden.

■ Flugasche darf unter Berücksichtigung ihrer maximal anrechenbaren Menge, im Rahmen der üblichen Einschränkungen des Abschnitts 5.2.5.2.2 nach [18], mit einem k-Wert von 0,7 angerechnet werden.

■ Dabei muss der äquivalente Wassermenge $(w/z)_{\text{eq}} = w/(z + 0,7 \cdot f) \leq 0,60$ betragen.

■ Normative Grenzwerte des Mehlkorngehalts (bei Betonen $\leq C50/60$ liegt diese Grenze bei 550 kg/m^3) dürfen überschritten werden.

Mit der Tabelle 2 werden über die normativen Vorgaben hinaus Vorschläge zu den Ausgangsstoffen unterbreitet, die in Bezug auf die besonderen Einbauverfahren, den Einbaubedingungen und den häufig massigen Bauteilen sinnvoll sein können.

2.5.3 Expositions-, Feuchtigkeits- und Mindestdruckfestigkeitsklassen

Unbewehrte Bauweisen sind in X0 einzuteilen. Aussteifende und tragende Unterwasserbetone sind in die Expositionsklasse XC1, sofern bewehrt, und WF einzuordnen. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob ein chemischer Angriff (XA) auf den Beton zu erwarten ist. Dieser kann aus dem Baugrund, dem Grundwasser oder aus dem Füllwasser (wenn dauerhaft beaufschlagt) herrühren.

Bei Unterwasserbauteilen im Meerwasser oder im Tidebereich

Tabelle 2: Vorschläge zu Ausgangsstoffen für Unterwasserbetone

Ausgangsstoffe	Zusätzliche Empfehlungen und Hinweise zur Auswahl und Anwendung
Zement	<ul style="list-style-type: none"> – LH-Zemente, VLH-Zemente und/oder CEM III-Zemente mit geringer Festigkeitsklasse – Gutes Fließverhalten wird unterstützt durch erhöhte Zement- und Flugaschegehalte. Zementgehalt bzw. Klinkergehalt jedoch nicht zu hoch wählen, um bei dicken Bauteilen die Rissgefahr zu minimieren. – Zementgehalte $\geq 350 \text{ kg/m}^3$ (bei Betonen ohne Flugasche) auch z. B. bei Größtkorn der Gesteinskörnung 16 mm, um sicherzustellen, dass genügend Mehlkorn vorhanden ist.
Zusatzstoffe (einschließlich Fasern)	<ul style="list-style-type: none"> – Einsatz von Flugasche empfohlen – Bindemittelgehalte (Z+FA) i. d. R. zwischen 350 kg/m^3 bis 420 kg/m^3; 280 kg/m^3 bis 320 kg/m^3 Zement und 70 kg/m^3 bis 140 kg/m^3 Flugasche [5] – Stahlfasern oder andere Fasern können die Nachrisszugfestigkeit verbessern und sich positiv auf die Rissbildung und Rissbreiten auswirken. Beim Einsatz von Fasern ist der Einfluss auf die Pumpfähigkeit und der Wasseranspruch zu prüfen. Der Wassergehalt und der Zusatzmitteleinsatz sind ggf. anzupassen.
Zusatzmittel	<ul style="list-style-type: none"> – Bei Verwendung von Zusatzmitteln sind insbesondere die zeitlich begrenzte Wirksamkeit, die Sensibilität und das Ansteifverhalten gegenüber Temperaturschwankungen (Sommerbetonagen und kaltes Wasser) zu beachten. – Die Wirksamkeit der Zusatzmittel und deren Wechselwirkungen mit allen Ausgangsstoffen sollten in einer erweiterten Erstprüfung anhand der erwarteten Umgebungstemperaturen überprüft werden. – In der Regel werden Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) eingesetzt. – Eine planmäßige FM-Nachdosierung auf der Baustelle sollte nicht erfolgen. Ist eine FM-Nachdosierung notwendig, ist eine über die normative Mindestmischzeit von 1 min/m³ hinausgehende Mischzeit sinnvoll. – FM reduzieren den Wasseranspruch und dienen der Konsistenzhöhung und ggf. -haltung. Es sind FM erforderlich, die die Robustheit des Unterwasserbetons nicht gefährden (Sättigungsgrenzen, praxisnahe Temperaturbereiche, erforderliche Mischintensität und Mischzeit, Entmischungssensibilität, etc.). – Insbesondere bei großen Sohlen, und den damit eventuell verbundenen Risiken in der Anlieferung, sollten Verzögerer (VZ) in Erwägung gezogen werden. Ggf. ist dabei die DAfStb-Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit [19] zu berücksichtigen. – Ggf. sind Stabilisierer (ST) sinnvoll, die bei einigen Herstellern auch Unterwasser-Compounds genannt werden. Sie erhöhen die Viskosität sowie den Erosionswiderstand und reduzieren Auswaschungen. Die Zugabe erfolgt im Werk und die Herstellerangaben sind zu beachten.
Gesteinskörnung	<ul style="list-style-type: none"> – Größtkorn 32 mm empfehlenswert, bei ungünstiger Kornform sollte ein Größtkorn von 16 mm gewählt werden, um die Fließfähigkeit zu verbessern. – Sieblinie der Gesteinskörnung sollte im Bereich der Sieblinie „B“ oder etwas oberhalb liegen. – Sieblinie mit stetigem Kornaufbau – Für ein gutes Fließverhalten möglichst natürliche, ungebrochene Gesteinskörnung verwenden. Diese sollte möglichst „gedrungen“ sein [5]. – Anhaltswerte für günstige Mehlkorn- und Feinstsandgehalte: GK 16 mm $\approx 500 \text{ kg/m}^3$, GK 32 mm $\approx 450 \text{ kg/m}^3$ [5].

ist die Expositionsklasse XS2 bzw. XS3 zu wählen, sofern es sich um stahlbewehrte Bauweisen handelt oder Stahlbauteile (z.B. Ankerteile ohne Korrosionsschutz) eingebunden sind. XM, XF und XD können de facto nicht auftreten. Einzige denkbare Ausnahmen können XF und XM im Tidebereich von Hafengebäuden sein. Bei der Berührung der Bauteile mit Meerwasser werden die Bauteile zusätzlich nach Norm der Expositionsklasse XA2 zugeordnet [9, 18].

In der Regel ist im Binnenland die Feuchtigkeitsklasse WF zu wählen und im Einflussbereich von Meerwasser WA.

Die Mindestdruckfestigkeit ergibt sich bei Unterwasserbeton häufig aus der Tragwerksplanung. Unter einem möglichen WU-Kriterium (Beton mit hohem Wassereindringwiderstand) wäre ein C25/30 erforderlich. Aus den Grenzwerten der Zusammensetzung (Wasserzementwert und Mindestzementgehalt) für Unterwasserbetone [18] ergibt sich ohnehin eine Mindestdruckfestigkeit von \geq C20/25.

Aufgrund der oft massigen Bauteilabmessungen und den Anforderungen an die Dichtigkeit sind unplanmäßige Trennrisse aus frühem Zwang möglichst zu vermeiden. Daher sollten Betone mit langsamer Festigkeitsentwicklung gewählt werden.

Neben der obligatorischen Prüfung der Mindestdruckfestigkeit (nach 28 d, ggf. 56 d oder 91 d) sollte auch eine Mindestdruckfestigkeit zum Lenzeitpunkt vom Tragwerksplaner vorgeben werden, wenn der Lenzeitpunkt vor den vorgenannten Prüfzeitpunkten liegt. Es empfiehlt sich diesen Wert in der Erstprüfung, ggf. auch unter Beachtung von Grenztemperaturen, zu überprüfen. Im Winter kann es zu einer deutlich verlangsamten Festigkeitsentwicklung durch das kalte Wasser kommen, was sich auch auf den Bauablauf auswirken kann. Da Unterwasserbetone bei entsprechenden Wassertiefen nicht frostgefährdet sind (Dichteanomalie des Wassers), sind Winterbetonagen möglich.

Bei anspruchsvollen Unterwasserbetonkonstruktionen (z. B. hohe Auftriebskräfte, hohe Biegemomente) kann eine Anforderung an die Zugfestigkeit aus statischen Gründen sinnvoll sein. Diese kann mittels der Spaltzug- oder Biegezugfestigkeitsprüfung abgeschätzt werden.

2.5.4 Frischbetoneigenschaften

Konsistenz und Fließfähigkeit

Der Beton muss sich ohne Verdichtungsarbeit selbst nivellieren. Dies ist wesentlich für die Ebenheit der Unterwasserbetonfläche. Daher ist die Konsistenz eine wichtige Frischbetoneigenschaft.

Es sollten Ausbreitmaße nach Zielmaß (Toleranz \pm 30 mm) vereinbart werden. Dabei haben sich 550 mm bis 650 mm bewährt [5]. Die in der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [18] vorgeschlagene „weiche Konsistenz“ (F3) ist im Regelfall nicht zu empfehlen!

Das Ausbreitmaß beschreibt jedoch in erster Linie die Verdichtungswilligkeit von Rüttelbetonen. Hierzu wird durch 15-maliges Anheben und Fallenlassen einer Prüfplatte die Verdichtungswilligkeit abgeschätzt [20]. Unterwasserbeton wird grundsätzlich nicht verdichtet. Die Übertragbarkeit auf die Fließfähigkeit des Unterwasserbetons ohne Verdichtung ist somit nur bedingt möglich.

Besser geeignet ist die Bestimmung des Setzfließmaßes [21]. Dies wird im europäischen Ausland oft angewandt, um die Verarbeitbarkeit besser einzuschätzen. In Deutschland finden diese Prüfungen bei Selbstverdichtenden Betonen Anwendung [22, 23].

Aktuelle Erfahrungen zeigen, dass Setzfließmaße zwischen 460 mm (Wehrbaustelle Neuwerben) und 480 mm (Schleusenbaustelle Gleesen) gut beim Einbau funktionierten. Dabei kommt es auch nicht zur Unter- und Überschreitung der empfohlenen Ausbreitmaße nach [5]. Dies passt auch grob zu den Anhaltswerten aus dem „Leitfaden Kontraktorbeton für Tiefgründungen“ [16, D4]. Dort geben die Autoren für Contractorbetone bei Bohrpfehlen ein Setzfließmaß von 400 mm bis 550 mm an.

Das Fließvermögen des Unterwasserbetons ist während der gesamten Betonage sicherzustellen. Deshalb sollte die Konsistenz während der gesamten Betonage regelmäßig geprüft und dokumentiert werden.

Darüber hinaus sollte der Beton mit einer möglichst geringen und gleichbleibenden Restwassermenge (Recyclingwasser) eingestellt werden, um eine gleichbleibende Konsistenz und Förderfähigkeit zu gewährleisten.

Entmischungsstabilität, Blutneigung und Robustheit

Die selbsttätige Dichtlagerung von Unterwasserbetonen ohne Verdichtungsarbeit ist eine große Herausforderung. Hierzu ist eine Abstimmung der Zusammensetzung auf die Einbauart sinnvoll.

Neben den schon genannten Vorschlägen zu den Ausgangsstoffen sollte ein guter Zusammenhalt durch einen hohen Mörtelanteil angestrebt werden. Bei üblichen Unterwasserbetonen haben sich rund 600 l Mörtel/m³ Beton bewährt [5].

Bei Unterwasserbetonen muss sichergestellt werden, dass der Frischbeton entmischungsstabil ist und nicht zu stark blutet. Hierzu sind laut Norm [4, 18] – wenn man von der Augenscheinprüfung absieht – keine Prüfungen vorgesehen. Folgende Prüfungen können zur besseren Einschätzung der Entmischungsstabilität und der Robustheit im Sinne des Hefts 637 des DAfStb [24] herangezogen werden. Folgende Prüfungen sollten zumindest bei anspruchsvollen Unterwasserbetonen (z. B. hohe Bauteildicken, große Pumptiefe, komplexe Bauteilgeometrie, flächig bewehrte Unterwasserbetone, im Endzustand statisch mitwirkende Bauteile) erwogen werden:

- Bestimmung der Blutwassermenge im Eimerverfahren $< 10 \text{ kg/m}^3$ [25]
- Visual Stability Index Test (VSI) nach [26], beschrieben in [16] und [D4]
Grundsätzlich sollte ein Bereich VSI 0 bis 1 (Bild 9) angestrebt werden. Aufgrund der Zusammensetzung ist jedoch mit einem Blutrind aus Wasser und Zementleim zu rechnen. Dieser sollte jedoch 5 mm nicht überschreiten. Entmischungserscheinungen mit Anhäufungen von Grobkorn sind zu vermeiden [16, D4].
- Bestimmung der Filtratwassermenge nach dem Bauer-Verfahren oder ÖVBB-Merkblatt „Weiche Betone“ [27] (Verfahrensbeschreibungen siehe Anhang A10.1 und A10.2 [16, D4]). Eine Korrelationstabelle der Filtratwassermengen beider Verfahren ist [28] zu entnehmen.

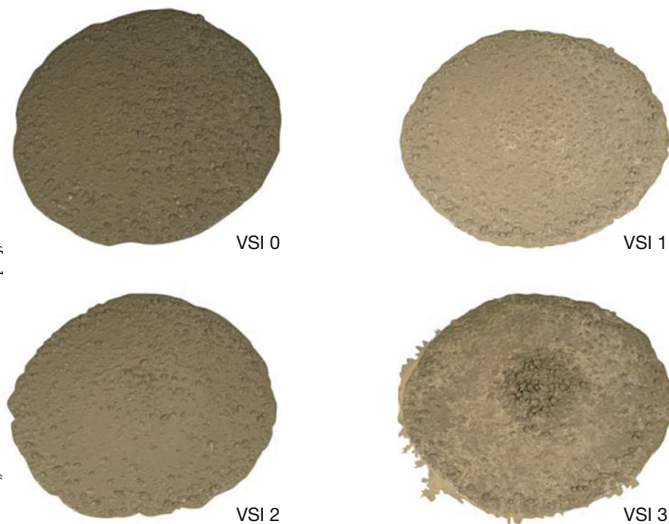


Bild 9: Bewertung mittels visuellem Stabilitätsindex – VSI (Visual Stability Index)

Für die Prüfverfahren zur Ermittlung der Filtratwassermenge liegen noch keine Erfahrungen bzw. Veröffentlichungen zu Unterwasserbetonen vor. Nach [28] kann man sich jedoch an die Filtratwassermengen für „Weiche Betone“ des ÖVBB-Merkblatts [27] anlehnen. Dabei werden die Grenzwerte für 15 und 60 Minuten im Rahmen der Erst- und Baustellenprüfung getrennt vorgeschlagen. Die Untersuchungen zeigen, dass bei einem Wasserzementwert von 0,60 mit relativ hohen Filtratwassermengen zu rechnen ist [28].

Auch die Bewertung des so genannten Filterkuchens im Bauer-Verfahren kann dem Betontechnologen Aufschlüsse zur Robustheit unter Druck liefern.

2.5.5 Betonkonzept, Betoneigenschaften und Prüfungen Allgemeines

Unterwasserbetone sind in der Praxis oft massive Bauteile (kleinste Bauteilabmessung ≥ 80 cm). Daher ist es sinnvoll, zusätzlich die DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [29] zu vereinbaren. Daraus ergeben sich technische und wirtschaftliche Vorteile wie der Nachweis der Mindestdruckfestigkeit nach 56 d oder länger und die Verringerung der Mindestanzahl an Probekörpern für die Druckfestigkeitsnachweise.

Weitere ausführliche Details zu massigen Bauteilen sind im Zement-Merkblatt B11 zu finden [30].

Bei Bauverträgen im Wasserbau nach ZTV-W Leistungsbereich 215 [31, D6] und der ergänzenden A1-Änderung [D7] ist zu beachten, dass Unterwasserbeton dort nicht über die Vorgaben der Norm [18] hinaus geregelt wird. Im zugehörigen Standardleistungskatalog [32, D8], sind Leistungspositionen für Unterwasserbeton erfasst.

Bei Unterwasserbetonen sind Erstprüfungen [18] und Überwachungsprüfungen nach Überwachungsklasse 2 [4] durchzuführen.

Erstprüfungen

Der Umfang der Erstprüfung nach Norm [18] für den Frischbeton sollte aufgrund der besonderen Herstellung eines Unterwasserbetons erweitert werden. Dabei sollten z. B. zusätzliche Prüfungen der Konsistenz mit geringeren Frischbetontemperaturen (z. B. bei $+5$ °C, $+10$ °C bzw. $+15$ °C) durchgeführt

werden. Anders als bei Hochbaubetonen ist für die Betoneigenschaften die Wassertemperatur während der Betonage und der Erhärtung maßgebend. Dabei kommt der Wirksamkeit stabilisierender und verflüssigender Zusatzmittel, gerade bei geringeren Temperaturen, eine hohe Priorität zu. Diese können z. B. Einfluss auf die Fließeigenschaften, die Mischungsstabilität und erforderliche Mindestmischzeiten haben. Auch das Ansteifverhalten und die Dauer der Verarbeitbarkeit sollten geprüft werden. Hier kann z. B. der Knetbeutelversuch nach DIN 18218 [33] hilfreich sein.

Auch beim Festbeton sollte der Umfang der Erstprüfungen erweitert werden, zumindest dann, wenn der Unterwasserbeton vor dem sonst üblichen Prüfzeitpunkt der Druckfestigkeit von 28 d oder 56 d statisch, z. B. durch das vorzeitige Lenzen der Baugrube, beansprucht wird. Die zusätzliche Prüfung der Druckfestigkeit bei niedrigen Temperaturen (wie beim Frischbeton beschrieben) ist sinnvoll. Auch eine Prüflagerung dauerhaft unter Wasser, wie in der Referenzprüfkörperlagerung [34] vorgesehen, macht bei Unterwasserbetonen Sinn. Dies entspricht praktisch der Einbausituation.

Das Gelingen eines Unterwasserbetons ist, neben den vorgenannten Eigenschaften, insbesondere von der Förder- und Einbaufähigkeit sowie der Robustheit des Frischbetons abhängig. Weitere Vorschläge hierzu finden sich im Abschnitt 2.5.4.

Prüfungen im Rahmen der Bauausführung

Unterwasserbeton ist in die Überwachungsklasse 2 einzuordnen [4]. Die dort genannten Mindestanforderungen hinsichtlich der Prüfung und Überwachung des Betons sind in der Regel nicht ausreichend. Die rechtzeitige Erstellung eines Beton- und Einbaukonzepts bzw. eines QS-Plans ist ratsam. Die hier beschriebenen und nachfolgenden Hinweise und Empfehlungen gehen zum Teil weit über die normativen Anforderungen an Überwachungsleistungen hinaus und sind somit gesondert zu vereinbaren und zu vergüten.

Die Prüfungen und der Prüfumfang auf der Baustelle sollten auf die oben genannte erweiterte Erstprüfung abgestimmt sein. In jedem Fall sollte die Konsistenz, die Frischbetontemperatur und das Ansteifverhalten (bei Wassertemperatur) während der gesamten Betonage geprüft werden.

Insbesondere bei anspruchsvollen Betonagen und Bauteilen sollte darüber hinaus ein Verarbeitungsversuch der geplanten Betonzusammensetzung auf der Baustelle durchgeführt werden. Hierdurch besteht die Möglichkeit, die Betonzusammensetzung an die speziellen bauverfahrenstechnischen Randbedingungen anzupassen [5]. Bei Pumpbeton sind der Einfluss der Pumpe und die Länge der anschließenden Pumpleitung im Hinblick auf die Förderfähigkeit zu beachten.

Im Detail werden zur Zusammensetzung sowie zu den Frischbetoneigenschaften und deren Prüfung in den Abschnitten 2.5.2 bis 2.5.4 konkrete Vorschläge gemacht.

■ 3 Erosionsfester Beton (Einbringen im freien Fall)

Während bei den bisher beschriebenen Verfahren der Beton beim Fördern unter Wasser geschützt wird, um Entmischungen zu vermeiden, kann erosionsfester Beton frei durchs Wasser fallend eingebaut werden.

Einem Transportbeton werden hierzu im Werk stabilisierende Zusatzmittel (auch UW-Compound genannt) zugegeben, die die Viskosität des Betons erhöhen und dem Beton den notwendigen inneren Zusammenhalt geben. Die stabilisierenden Zusatzmittel entsprechen der DIN EN 934-2, Tabelle 4 (Spezielle Anforderungen für Stabilisierer) [35]. Die Neigung zum Bluten und zum Entmischen des Betons wird verringert. Produktdatenblätter bestimmter Zusatzmittelhersteller für Stabilisierer beschreiben die Anwendungsgebiete und geben die Zugabemengen an (teilweise in Abhängigkeit vom Fließverhalten, z. B. stehendes Gewässer, fließendes Gewässer, freier Fall) [36, D9, 37, D10, 38, D11].

Unabhängig hiervon sollte grundsätzlich zunächst geprüft werden, ob verfahrenstechnisch Contractor-Verfahren (Abschnitte 2.1 – 2.4) möglich sind. Rohr- oder schlauchgeführte Verfahren erhöhen die Sicherheit gegen Entmischungen.

Darüber hinaus sollte der Erosionswiderstand des Betons z. B. in Anlehnung an die BAW-Richtlinie „Prüfung von hydraulisch gebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (RPV)“ [39, D12] mindestens mit dem Ausspülverfahren am Frischbeton geprüft werden (siehe auch Zement-Merkblatt B15 [1]).

■ 4 Literatur

- [1] Zement-Merkblatt Betontechnik B15, „Mörtel und Betone zum Ausguss, zur Verklammerung und Injektion unter Wasser“, InformationsZentrum Beton, Düsseldorf (Hrsg.), (in Vorbereitung)
- [2] DIN 18331:2019-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Betonarbeiten
- [3] Heft 526 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN EN 12620, Beuth-Verlag, Berlin (Stand: 12/2011)
- [4] DIN EN 13670:2011-03 Ausführung von Tragwerken aus Beton; in Verbindung mit DIN 1045-3 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN EN 13670:2012-03
- [5] DBV-Merkblatt „Unterwasserbeton“, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin (Stand 10/2014)
- [6] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 2 Grundbau (Abschnitt 1 Baugruben) (Stand 12/2014)
- [7] Schreitl, B.: Bauabschnitt U1/3 – verankerte Unterwasserbetonsohlen. ZEMENT+BETON 02/2003, S. 2–7
- [8] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton – Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA, DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 und DIN EN 13670 in Verbindung mit DIN 1045-3, Beuth Verlag, Berlin (Stand 06/2021)
- [9] DIN EN 1992-1-1:2011-01 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau und Nationaler Anhang (NA) – National festgelegte Parameter (Stand 04/2013), inkl. Änderungen A1 (Stand 03/2015) und NA/A1 (Stand 12/2015)
- [10] DBV-Merkblatt „Industrieböden aus Stahlfaserbeton“, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin (Stand 07/2013)
- [11] Laube, M.; Oncken, P.; Rusack, T.: Untersuchungsbericht zur Herstellung der Unterwasserprobessohlen beim Bau der Baugrube B debis, Potsdamer Platz Berlin (Nr. 8900/95). MPA Braunschweig 10/1995 und 12/1995
- [12] Petersen, L.: Yukon Bay Zoo Hannover – eine betontechnologische Herausforderung. Tagungsband der 4. Betonfachtagung Nord „WU-Konstruktionen als Regel- und Sonderbauweise“, Hannover 11./12.10.2012
- [13] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben (EAB), 6. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2021
- [14] www.beton.wiki. Ein Lexikon der InformationsZentrum Beton GmbH (abgerufen im Dezember 2021)
- [15] Tegelaar, R.: Unterwasserbeton u. Böhling, E.; Giesbrecht, P.: Bohrfahlbeton. Schriftenreihe Spezialbetone Band 1, Verlag Bau+Technik, Erkrath 1998
- [16] Gemeinsame Arbeitsgruppe „Beton“ der European Federation of Foundation Contractors, Faversham, UK (EFFC) und Deep Foundations Institute, Hawthorne, NJ, USA (DFI), (Hrsg.): Leitfaden Kontraktorbeton für Tiefgründungen (deutschsprachige Fassung), 2. Ausgabe, 2018
- [17] DBV-Rundschreiben 244, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin, 03/2015
- [18] DIN EN 206-1:2001-07 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, in Verbindung mit DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [19] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton) – Erstprüfung, Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung, Beuth Verlag, Berlin (Stand 11/2006)
- [20] DIN EN 12350-5:2019-09 Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß
- [21] DIN EN 12350-8:2019-09 Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch
- [22] DIN EN 206-9:2010-09 Beton – Teil 9: Ergänzende Regeln für Selbstverdichtenden Beton (SVB)
- [23] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) –
Teil 1: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA
Teil 2: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 206-1, DIN EN 206-9 und DIN 1045-2
Teil 3: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 13670 und DIN 1045-3, Beuth Verlag, Berlin (Stand 09/2012)
- [24] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.): DAfStb-Heft 637, Sachstandbericht Frischbeton – Eigenschaften, Einflüsse und Prüfungen, Beuth Verlag, Berlin (Stand 11/2020)
- [25] DBV-Merkblatt „Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton“, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin (Stand 01/2014)
- [26] ASTM C 1611, Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, 2021 (beschrieben in [15], [D4], Anhang A)

- [27] Merkblatt „Weiche Betone – Betone mit Konsistenz $\geq F 59$ “; Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik (ÖVBB), Wien (Stand 12/2009)
- [28] Hemrich, W.; Mellwitz, R.; Arndt, T.: Frischbetonuntersuchungen an „weichen Betonen“ für den Spezialtiefbau. Beton-Informationen 54 (2014), Heft 3, S. 43–46
- [29] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie – Massige Bauteile aus Beton – Teil 1: Ergänzungen zu DIN 1045-1, Teil 2: Änderungen und Ergänzungen zu DIN EN 206-1 und DIN 1045-2, Teil 3: Änderungen und Ergänzungen zu DIN 1045-3, Beuth Verlag, Berlin (Stand 04. 2010)
- [30] Zement-Merkblatt Betontechnik B11, Massige Bauteile aus Beton, InformationsZentrum Beton, Düsseldorf (Hrsg.), (Stand 11/2019)
- [31] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Wasserstraßen und Schifffahrt (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), ZTV-W LB 215, (Ausgabe 2012) mit A1 – Änderung (Ausgabe 2019)
- [32] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Wasserstraßen und Schifffahrt (Hrsg.): Richtlinien für die Aufstellung und Fortschreibung des Standardleistungskataloges (STLK) für den Wasserbau, STLK-Richtlinien, Wasserbau (Ausgabe 2016)
- [33] DIN 18218:2010-01 Frischbetondruck auf lotrechte Schallungen
- [34] DIN EN 12390-2:2019-10 Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- [35] DIN EN 934-2:2012-08 Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 2: Betonzusatzmittel – Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung
- [36] Produktdatenblatt „Sika UW Compound-100“, Sika Deutschland GmbH, Leimen (Stand 04/2020)
- [37] Merkblatt „MasterMatrix UW 420“, Master Builders Solutions Deutschland GmbH, Staßfurt (Stand 01/2021)
- [38] Technisches Merkblatt „Stabilisierer UW50 (ST)“, Ha-Be Betonchemie GmbH, Hameln (Stand 08/2020)
- [39] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.): BAW-Richtlinie „Prüfung von hydraulisch gebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen (RPV)“, Karlsruhe 2017

Weitere Literatur

Pickhardt, R.; Bose, T.; Weisner, A.: Beton – Herstellung nach Norm – Arbeitshilfe für Ausbildung, Planung und Baupraxis, 22. Aufl., Verlag Bau+Technik, Erkrath 2020

Richter, T.; Peck, M.; Pickhardt, R.: Bauteilkatalog – Planungshilfe für dauerhafte Betonbauteile, 9. Aufl., Verlag Bau+Technik, Erkrath 2016

Merkblatt Unterwasserbeton – Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V., WIN (Stand 01/2019)

Heinzelmann, H.: Unterwasser-Betonsohle am Flughafen München, Tiefbau 8/2002

Tegelaar, R.: Unterwasserbeton – Einbauverfahren und Anwendung. Beton-Informationen 25 (1985), Heft 4, S. 35–43

Freese, D.; Höfig, W.; Gortkopp, U.: Neuartige Betone für den Wasserbau. beton 28 (1978), Heft 6, S. 205–208

Download-Verzeichnis (kostenfrei, Stand Dezember 2021)

- [D1] www.bast.de/BASSt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Baudurchfuehrung/ZTV-ING.html
- [D2] <https://www.beton.wiki/index.php?title=Hydroventilverfahren> (27.10.2021)
- [D3] <https://www.beton.wiki/index.php?title=K%C3%BCbeverfahren> (27.10.2021)
- [D4] https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Verband/Bundesfachabteilungen/Spezialtiefbau/2018-09-28_DAS_TremieGuide-DE_V1.1s.pdf
- [D5] <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkbl%C3%A4tter/B11.pdf>
- [D6] https://izw.baw.de/publikationen/stlk-w_ztv-w/0/ZTV-W_LB215_Ausgabe_2012-5_.pdf
- [D7] https://izw.baw.de/publikationen/stlk-w_ztv-w/0/ZTV-W_LB215_A1_2019.pdf
- [D8] https://izw.baw.de/publikationen/stlk-w_ztv-w/1/lb215_2012-12.pdf
- [D9] <https://deu.sika.com/content/dam/dms/deaddconst01/6/sika-uw-compound-100.pdf>
- [D10] https://assets.master-builders-solutions.com/de-de/tm_mastermatrix_uw_420_2016_11_08.pdf
- [D11] https://www.ha-be-hameln.de/_mediafiles/28203.pdf
- [D12] https://izw.baw.de/publikationen/richtlinien/0/BAWRichtlinie_Pruefung_hydr_Verguss_RPV_2017.pdf

Beratung und Information zu allen Fragen der Betonanwendung

Herausgeber

InformationsZentrum Beton GmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

www.beton.org

Kontakt und Beratung vor Ort

Büro Berlin, Kochstraße 6–7, 10969 Berlin, Tel.: 030 3087778-0, berlin@beton.org

Büro Hannover, Hannoversche Straße 21, 31319 Sehnde, Tel.: 05132 502099-0, hannover@beton.org

Büro Beckum, Neustraße 1, 59269 Beckum, Tel.: 02521 8730-0, beckum@beton.org

Büro Ostfildern, Gerhard-Koch-Straße 2+4, 73760 Ostfildern, Tel.: 0711 32732-200, ostfildern@beton.org

Verfasser

Dipl.-Ing. (FH) André Weisner, Dipl.-Ing. Roland Pickhardt, InformationsZentrum Beton GmbH