

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 87 (1969)
Heft: 44

Artikel: Die Qualitätskontrolle von Beton im Vorfabrikationswerk
Autor: Leeb, D. / Liechti, O.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-70808>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Qualitätskontrolle von Beton im Vorfabrikationswerk

Von D. Leeb und O. Liechti, Bauingenieure, Zürich

I. Einleitung

In immer mehr Industriezweigen und in immer grösserem Umfang erfolgt heutzutage eine laufende Qualitätsüberwachung von Fertigprodukten oder Werkstoffen mit Hilfe statistischer Methoden. Die Überwachung erstreckt sich dabei über den gesamten Verlauf des Produktionsprozesses und kann im wesentlichen durch die folgenden drei Abschnitte beschrieben werden:

1. Eingangskontrolle der weiterzuverarbeitenden Produkte, Werkstoffe oder Rohstoffe.
2. Zwischenkontrollen zur Qualitätssteuerung während einzelner Produktionsabschnitte.
3. Endkontrolle bzw. Qualitätsprüfung am Fertigprodukt.

Voraussetzung jeder Kontrolle sind eindeutige Angaben darüber, was unter Qualität verstanden werden soll. Die Qualität eines Fertigproduktes oder Materials ist deshalb durch die Einführung verschiedener Qualitätsmerkmale oder -Eigenschaften festzulegen, die im allgemeinen quantitativ durch die Angabe von Spezifikationen zu formulieren sind.

Bei den Qualitätseigenschaften treten wie bei allen messbaren Beobachtungen in Naturwissenschaft und Technik Streuungen auf. Es ist daher angebracht, zur Beschreibung und Beurteilung von streuenden Qualitätseigenschaften die Methoden der Statistik anzuwenden, welche dafür verschiedene Kriterien entwickelt hat. Einige davon, die sehr häufig gebraucht werden, seien kurz erwähnt:

- a) Der im *Mittel erreichte Wert* (arithmetisches Mittel aller Einzelmesswerte) und die dabei auftretende *Gleichmässigkeit*. Die Gleichmässigkeit wird ausgedrückt durch die Streuung der Einzelmesswerte, als deren Mass im allgemeinen die sogenannte «Standardabweichung» verwendet wird.
- b) Der *Mindestwert*. Das ist jener Wert, der von keinem einzigen Einzelmesswert unterschritten wird.
- c) Die *Fraktile*, angegeben z.B. als 5% oder als 16% Fraktile. Bei der Feststellung einer bestimmten Qualitätseigenschaft ist z.B. die 5%-Fraktile jener Wert, der nur von 5% der gesamten Einzelmesswerte unterschritten wird. In der statistischen Qualitätskontrolle wird die Fraktile heute sehr häufig als Kriterium angewendet, vor allem zur Festlegung eines «Mindestwertes», welcher dann nicht mehr als absoluter Mindestwert, sondern als sehr kleine Fraktile angesehen wird.

Nach welchem Kriterium die an das einzelne Qualitätsmerkmal gestellte Anforderung dann beurteilt werden soll, ist eine Sache der Vereinbarung und in vielen Fällen durch Normen festgelegt.

Die Streuungen sind der Grund, warum die statistische Betrachtungsweise allmählich auch in den Betonbau Eingang findet. Es ist z.B. nicht richtig, wenn man sagt: der Beton eines Bauwerkes hat 300 kg/cm² Festigkeit. Man wird entweder hinzusetzen müssen «im Mittel 300 kg/cm²», oder man sagt, «der Beton hat mindestens 300 kg/cm² Festigkeit». In beiden Fällen wird stillschweigend eine Streuung der beobachteten Festigkeitswerte unterstellt, wobei man im zweiten Fall noch von der zweifelhaften Annahme ausgeht, dass man die «Mindestwerte» zuverlässig bestimmen könne. Es ist aber auch nicht richtig, die Qualität nach den allerniedrigsten möglichen Werten zu beurteilen. Nach der Wahrscheinlichkeitstheorie treten immer auch sehr kleine und sehr grosse Gütekriterien auf, allerdings mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit. Ein Beispiel dafür: Schon die erste Ausfahrt mit einem fabrikneuen Auto kann auf ebener Stadtstrasse mit einem Achsbruch enden. Dieses Ereignis lässt nach der Wahrscheinlichkeitstheorie noch kein Urteil über die Güte des Autos der betreffenden Marke zu. Es ist nämlich gar nicht möglich, ein Automobil so zu fertigen, dass solche Vorkommnisse völlig ausgeschlossen wären [1]. Die Qualität eines Produktes erkennt man nicht daran, ob, sondern nur daran, wie selten ausserordentliche Unterschreitungen (sogenannte «Ausreisser» im statistischen Sinne) einzelner Qualitäts-eigenschaften auftreten.

Das bisherige Denken und Rechnen erfolgte fast ausnahmslos mit feststehenden Grössen, obwohl die Erfahrung damit nur selten übereinstimmte. Unsere Denkweise sollte vermehrt auf die Wirklichkeit eingehen, die schwankenden Grössen, die Zufallsgrössen als gegeben hinnehmen und mit ihnen umgehen lernen.

II. Die Güteanforderungen der neuen SIA-Norm 162

Der Wunsch, die Güte des Betons genauer zu umschreiben, führte auch in der Neufassung der SIA-Norm Nr. 162 [2] zur Aufstellung einer Reihe verschärfter Anforderungen. Gegenüber den bisherigen Bestimmungen unterscheiden sich die Betonarten BN, BH und BS voneinander zunächst ganz wesentlich durch Art und Umfang der durchzuführenden Prüfungen. Dazu ein erläuterndes Beispiel: Der Übergang von der Betonart BN zur Betonart BH z.B. bedeutet nicht nur das Ergreifen von Massnahmen zur Erreichung der verlangten höheren Würfeldruckfestigkeit, z.B. Erhöhung der Zementdosierung, sondern vor allem die Einführung einer ganzen Reihe von Prüfungen, welche die Betonzusammensetzung und die Überwachung während der Herstellung betreffen.

Sodann wird für das Hauptqualitätsmerkmal des Betons, die «Würfeldruckfestigkeit», eine grundsätzlich neue Anforderung aufgestellt. Sie wird in der neuen Norm durch zwei Kriterien beschrieben:

1. Nennwert, ausgedrückt durch die 16%-Fraktile
2. Mindestwert, der von keinem Prüfwert unterschritten werden darf, ausgedrückt durch die maximal erlaubte Unterschreitung des Nennwertes. Grösse je nach Betonart, z.B. bei BH 80% des Nennwertes.

Bei einer sehr grossen Anzahl von Prüfwerten dürfen außerdem einzelne Prüfwerke (etwa 1 bis 2%) noch unter dem Mindestwert liegen.

Die 16%-Fraktile oder der Nennwert der Würfeldruckfestigkeit ist jener Wert, der von 16% aller Prüfwerte einer hinreichend grossen Probezahl unterschritten wird. Ein konkretes Beispiel: Es soll ein BH 300, d.h. ein Beton mit einem Nennwert der Würfeldruckfestigkeit von mind. $\beta_{w28} = 300 \text{ kg/cm}^2$ hergestellt werden. Zum Nachweis dieser Festigkeit werden im Verlauf der Betonierarbeiten beispielsweise 60 Würfelproben angefertigt. Der geforderte Nennwert ist dann erreicht, wenn höchstens 16% aller geprüften Würfel (also rund 10 Stück) eine geringere Festigkeit als 300 kg/cm² aufweisen, die der übrigen 50 Stück jedoch über diesem Wert liegt. Die gleichzeitig einzuhaltende Bedingung für den Mindestwert besagt, dass kein Prüfwert eine Festigkeit haben darf, die unter dem Wert $0,8 \cdot 300 = 240 \text{ kg/cm}^2$ liegt. Es ist selbstverständlich, dass beide Bedingungen, Nenn- und Mindestwert, praktisch nie zugleich massgebend werden. Bei kleiner Streuung der Festigkeit um ihren Mittelwert (arithmetisches Mittel aller Einzelprüfwerke) wird im allgemeinen immer der Nennwert massgebend werden. Wenn jedoch grössere Festigkeitsstreuungen auftreten, wird die Mindestwertbedingung bald einmal massgebend, d.h. der im Mittel anzustrebende Festigkeitswert muss dann so hoch sein, dass auch der kleinste dabei auftretende Prüfwert nicht unter den Mindestwert sinkt. Es würde hier zu weit führen, die Zusammenhänge zwischen den genannten zwei Bedingungen und dem Mittelwert genauer zu behandeln und deren Auswirkung auf die Praxis der Betonherstellung aufzuzeigen. Eine Reihe von Hinweisen zu diesem Thema sind in einer vor kurzem erschienenen Veröffentlichung [3] enthalten.

III. Die Besonderheiten der Qualitätskontrolle beim Beton

Im Vergleich zur Herstellung von Fertigprodukten oder Werkstoffen in der Industrie weist der Beton eine spezifische Eigentümlichkeit auf. Sie ist bedingt durch den zeitlichen

Ablauf seines Produktionsprozesses: Nach dem Mischen, Einbringen und Verdichten des Frischbetons dauert es noch einige Zeit, bis der daraus hergestellte Bauteil gebrauchsfähig ist.

Geht man von der Endkontrolle der geforderten Würfeldruckfestigkeit aus, so zeigt sich, dass die Prüfresultate entsprechend der langsamem Erhärtung des Betons sehr spät erhältlich sind. Eine rückwirkende Steuerung durch die Endkontrolle ist beim Beton daher nicht möglich. Wenn die ersten Prüfergebnisse vorliegen, ist mindestens ein Teil des Bauwerkes bereits vollendet, und eine Korrektur wäre meistens nur unter schweren wirtschaftlichen Einbussen möglich.

Die Prüfungen fördern die Betonfestigkeit also nicht direkt, sondern nur im Sinne einer Erfahrungsbildung. Sie besagen lediglich, dass eine Betonmischung, hergestellt nach einem bestimmten Rezept, nach 28 Tagen eine Würfeldruckfestigkeit von beispielsweise 450 kp/cm^2 ergeben hat, und dass eine genau gleich zusammengesetzte und behandelte Mischung mit kleinen Abweichungen voraussichtlich das gleiche Resultat zeigen würde [4].

Erwünscht ist aber, ähnlich wie bei anderen Produktionsprozessen, eine unmittelbare *Qualitätssteuerung* während der Herstellung. Die Lösung hierzu kann durch ein Zurückgehen auf die Grundlagen gefunden werden. Nach den heute ausgereiften Erkenntnissen der Betontechnologie hängt die Druckfestigkeit des Betons unmittelbar von den folgenden Einflussgrößen ab:

- Gesteinsfestigkeit
- Kornzusammensetzung
- Normenfestigkeit des Zements
- Verdichtungsgrad
- Erhärtungsgrad
- Wasser-Zement-Faktor (W/Z-Faktor)

Beim Schwerbeton — und nur von diesem soll hier die Rede sein — ist die Festigkeit des erhärteten Zementleims immer wesentlich kleiner als jene des Zuschlagstoffsteins. Die *Gesteinsfestigkeit* ist daher in dieser Beziehung keine dominierende Einflussgröße.

Der heutige Stand der Betontechnologie zeigt, dass die *Kornzusammensetzung* als Einflussgröße auf die Festigkeit des Betons bis-

her überbewertet worden ist. Sie hat jedoch in einem anderen Zusammenhang ihre Bedeutung. Die Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe bestimmt vor allem die Zementleimmenge, die zur Erzielung einer vorgegebenen Konsistenz des Frischbetons erforderlich ist. Sodann wird durch die Kornzusammensetzung eine Reihe weiterer Betoneigenschaften, wie z.B. Pumpfähigkeit des Frischbetons, Dichtigkeit, Frostbeständigkeit usw. beeinflusst. Für die Festigkeit des Betons ist jedoch die Kornzusammensetzung keine direkte, sondern eher eine mittelbare Einflussgröße, da eine gute und gleichmässige Kornzusammensetzung notwendig ist, um möglichst wirtschaftliche Betonmischungen mit möglichst kleiner Streuung zu erhalten.

Die *Normenmörtelfestigkeit* des Zementes einschliesslich ihrer Streuungen kann aus den Laborprüfungen der Zementwerke schon vor Herstellung des Betons ermittelt werden. In der Regel sind die Mittelwerte und die Streuungen der Normenmörtelfestigkeit bei den einzelnen Zementwerken voneinander verschieden, wobei der Grund dafür hauptsächlich in der jeweils besondern Rohstoffzusammensetzung des betreffenden Zementes liegt. Bei Entwurf neuer Mischungen für grössere Bauvorhaben ist es daher ratsam, sich über die wirklichen Festigkeitswerte der einzusetzenden Zementmarke zu vergewissern.

Wenn man *Verdichtungsgrad* und *Erhärtungsgrad* — wie auch immer definiert — als konstant annimmt, was bei einer Qualitätsprüfung zulässig ist, so bleibt schlussendlich als einzige und wichtigste direkte Einflussgröße bei der Betonherstellung der W/Z-Faktor übrig. Der W/Z-Faktor ist die entscheidendste Einflussgröße auf die Festigkeit von Beton und bildet die Hauptgrundlage einer zielsicheren Betonherstellung. Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen W/Z-Wert, Zementnormenfestigkeit und Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen nach K. Walz [5]. Die Darstellung zeigt, dass die Betondruckfestigkeit sehr empfindlich auf den W/Z-Faktor reagiert (kleine W/Z-Faktor-Änderungen haben schon relativ grosse Festigkeitsabweichungen zur Folge). Seine möglichst genaue Einhaltung wäre daher der wünschenswerte Idealzustand. Damit der Beton an der Einbaustelle verarbeitet und einwandfrei verdichtet werden kann, muss er eine den jeweiligen Verhältnissen angepasste Konsistenz aufweisen. W/Z-Wert und Konsistenz haben zunächst nichts miteinander zu tun. Eine weiche Frischbetonkonsistenz bedeutet nicht einen hohen W/Z-Wert, und eine sehr steife Konsistenz nicht einen niedrigen W/Z-Wert, denn es kann mit jedem praktisch vorkommenden W/Z-Wert jede beliebige Konsistenz eingestellt werden. Der Unterschied besteht lediglich in der erforderlichen Zementleimmenge, d.h. im Zementgehalt pro m^3 Fertigbeton. Soll bei einem kleinen W/Z-Wert (zur Erreichung hoher Würfeldruckfestigkeiten) eine sehr weiche Konsistenz vorhanden sein, so ist dazu ein entsprechend hoher Zementgehalt pro m^3 Fertigbeton erforderlich.

Schon geringe Änderungen in der Kornzusammensetzung und in der Mahleinheit des Zementes verändern jedoch bei konstant gehaltenem W/Z-Wert die Konsistenz. Die gleichzeitige Steuerung des W/Z-Wertes und der Konsistenz an der Mischmaschine ist des-

halb nicht möglich. Nicht etwa weil die heute verfügbaren Steuergeräte für die Dosierung der Gesamtwassermenge in der Praxis noch nicht genügend befriedigen, sondern weil die dabei auftretende Schwankung in der Konsistenz nicht gleichzeitig vermieden werden kann.

Die richtige Konsistenz hat aber den Vorrang vor der genauen Wassermenge, da sie für das Verarbeiten und Verdichten des Betons an der Einbaustelle unbedingt erforderlich ist. Dies bestätigt auch die heute geübte Praxis beim Einsatz von Dosierautomaten zur Steuerung der Gesamtwassermengen. Auch dort wird die einmal gewählte Konsistenz von Zeit zu Zeit von Auge oder mit einem Messgerät kontrolliert und bei merkbaren Abweichungen (ausgenommen Rezeptfehler), hervorgerufen z.B. durch Änderungen im Kornaufbau des Sand-Kies-Gemisches, wird der Dosierautomat nachreguliert, was natürlich eine Änderung des W/Z-Wertes zur Folge hat. Der W/Z-Wert kann also nur innerhalb gewisser Toleranzgrenzen eingehalten werden, weshalb bei seiner Festlegung ein Sicherheitsabstand einzukalkulieren ist. Der W/Z-Wert muss zu diesem Zweck stets etwas kleiner angesetzt werden, als zur Erreichung der gewünschten Festigkeit normalerweise notwendig wäre.

Fasst man nochmals zusammen, so ergibt sich:

Der W/Z-Wert als wichtigste Einflussgröße auf die Festigkeit des Betons kann nicht direkt gesteuert werden. Bleiben jedoch Herkunft und Granulometrie der Zuschlagstoffe sowie Zementsorte und Zementgehalt einer Mischung stets gleich, so besteht die Möglichkeit, über die Konsistenz des Betons auf den Wassergehalt, und damit auf den W/Z-Wert zu schliessen. Unter diesen Voraussetzungen ist die Konsistenz zur indirekten Einhaltung des W/Z-Wertes geeignet und stellt dadurch bei der Betonherstellung die wichtigste Steuergröße dar.

Abschliessend soll noch auf einige Besonderheiten hingewiesen werden, die bei der Prüfung dann vorhanden sind, wenn der Beton auf kleineren und mittleren Baustellen hergestellt wird: Die Probenentnahme für die Würfelprüfung und die Überwachung der Frischbetoneigenschaften wird im allgemeinen vom gleichen Personal ausgeübt, welches auch die Betonherstellung durchführt. Da die Produktion Vorrang hat, besteht bei Zeitnot die Gefahr, dass die Prüfung in den Hintergrund treten muss. Andererseits kann gar nicht so selten beobachtet werden, dass der Anfertigung von Probewürfeln eine geradezu auffallend grosse Sorgfalt gewidmet wird, die mit der eigentlichen Betonherstellung in gar keinem Zusammenhang steht. Hinzu kommt, dass die eigentliche Würfelprüfung in der Regel nicht auf der Baustelle oder in deren Nähe durchgeführt werden kann. Bis zum Eintreffen der Proben in der Prüfanstalt können somit noch verschiedene unkontrollierbare Einflüsse wirksam werden. Durch diese Besonderheiten wird die Aussagefähigkeit der Qualitätskontrolle stark beeinträchtigt.

IV. Qualitätskontrolle im Vorfabrikationswerk

Unter der Voraussetzung gleicher Ausgangsstoffe unterscheidet sich der in einem Vorfabrikationswerk hergestellte Beton, der

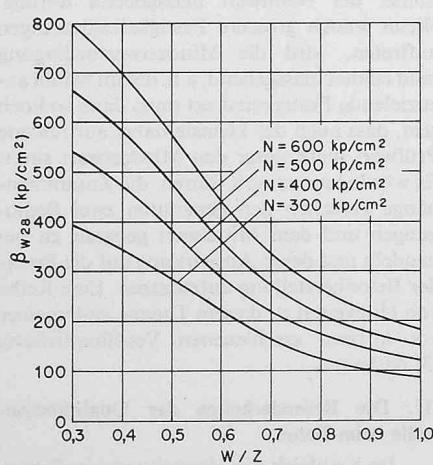


Bild 1. Zusammenhang zwischen Wasserzementfaktor, Zementnormenfestigkeit und Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen nach K. Walz

sogenannte «Werkbeton», vom normalen Baustellenbeton durch

- grössere Würfeldruckfestigkeiten
- hohe Gleichmässigkeit, d.h. sehr kleine Streuungen der Festigkeit um ihren Mittelwert
- jederzeit sicheres Erreichen der verlangten Würfeldruckfestigkeiten.

Es ist selbstverständlich, dass diese höhere Qualitätsstufe allein auf die Vorteile der industriellen Betonherstellung zurückzuführen ist, wie z.B. stets gleichbleibende Materialquellen und fast vollständige Ausschaltung des Wittringseinflusses bei Verarbeitung und Erhärtung. In Einzelfällen oder auch während kürzerer Zeitperioden sind solche Ergebnisse — oft mehr zufällig als gewollt entstehend — sehr wohl zu erwarten. Will man jedoch über längere Zeiträume hinweg eine immer gleich hohe Qualität erhalten, bzw. gesteuert erzielen, so kann das nur durch die konsequente Anwendung einer unabhängigen Qualitätskontrolle erreicht werden.

Voraussetzung zur wirksamen Überwachung des Herstellungsprozesses in allen Phasen sind ein mit modernen Geräten ausgerüstetes Betonlabor und ein gut ausgebildeter Laborant. Eine solche werkeigene Prüfstelle, deren Einrichtung und Personal hohen Ansprüchen genügt, bildet neben ihrer Hauptfunktion als Kontrollinstrument erst die eigentliche Grundlage zur vollen Ausnutzung der betontechnologischen Erkenntnisse. Mit ihrer Hilfe können die Komponenten des Betons — Zement und Zuschlagstoffe — systematisch untersucht und optimal zu jeder gewünschten Mischung zusammengesetzt werden. In der Prüfstelle kann der «eigene» Beton auf alle Einflüsse hin umfassend durchgetestet werden, so dass man sein Verhalten bei Änderung bestimmter Einflussgrössen mit der Zeit ganz genau kennt. Es kann dann nicht mehr passieren, dass man überrascht ist, wenn die Festigkeit nicht der Erwartung entspricht. Solche «Zufälle» gibt es bei einem ständig überwachten Beton nicht. Da nun im Verlauf von mehreren Jahren Tausende von Kubikmetern Beton mit stets gleichbleibender Zusammensetzung hergestellt werden, fallen viele Prüfergebnisse an. Durch die statistische Auswertung dieser Resultate entsteht eine statistisch erfassbare Erfahrung über den Werkstoff, seine Qualitätsgeschichte. Sie gibt eindeutig Auskunft über alle Qualitätsabweichungen, die innerhalb eines längeren Zeitraumes auftreten, und ist daher ein hervorragend geeigneter Massstab zur Beurteilung der Bemühungen eines Werkes, einen qualitativ stets gleichbleibenden Beton herzustellen.

Die Erkenntnis der vorstehend angeführten Gründe hat die STAHLTON AG im Jahre 1962 bewogen, die Qualitätskontrolle in ihrem Vorfabrikationswerk in Frick einzuführen. Über deren Aufbau und Durchführung soll nun berichtet werden.

1. Organisationsform und Aufgaben

Das zum Zweck der Eigenüberwachung geschaffene Betonlaboratorium wird durch einen vollamtlich tätigen Laboranten betreut. Dieser Laborant untersteht nicht der Betriebsleitung des Werkes, sondern der Entwicklungsabteilung der Firma. Damit ist gewährleistet, dass alle Kontrollen unabhängig von der Produktion durchgeführt werden können.

Das Betonlabor hat vor allem die folgenden beiden Aufgaben zu erfüllen:

- Durchführung der gesamten erforderlichen Prüfungen zur Kontrolle und Steuerung der Qualität von laufend hergestellten Betonarten.
- Durchführung von Prüfungen und Versuchen, die im Zusammenhang mit der materialtechnologischen Behandlung, insbesondere von Beton, Mörtel und ähnlichen Baustoffen, auftreten.

2. Hauptpunkte der Überwachung

Die wichtigsten Abschnitte der Überwachung können eingeteilt werden in:

- Kontrolle der angelieferten Sand-Kies-Komponenten und des Zementes
- Kontrolle und Steuerung von Konsistenz und Temperatur des Frischbetons
- Kontrolle der Absenkfestigkeit. Sie ist jene Festigkeit, die vorhanden sein muss, damit der Beton vorgespannt werden kann. (Spannbettvorspannung)
- Statistische Kontrolle der 2-, 3-, 7- und 28-Tage-Würfeldruckfestigkeiten

Die insgesamt 4 verschiedenen, im Werk erzeugten Betontypen unterscheiden sich von einander in der Zementdosierung, der Siebkurve der Zuschlagstoffe und der Konsistenz des Frischbetons. Der Standardbeton ist der meistverwendete; er wird vor allem zur Herstellung vorgespannter Betonelemente gebraucht.

Der Grad der Überwachung bei den einzelnen 4 Betontypen ist verschieden und wird im Hinblick auf den Anwendungszweck bestimmt. Die Kontrollen a) und b) werden bei allen Typen durchgeführt. Die Kontrolle c) nur bei vorgespannten Betonelementen. (An ihre Stelle tritt bei schlaff armierten Elementen die Kontrolle der Abhebe- oder Transportfestigkeit). Die statistische Kontrolle der Würfeldruckfestigkeit dagegen, die sogenannte Endkontrolle, wird nur an 2 Betontypen durchgeführt. An den übrigen beiden Typen, die nicht so häufig und nur in kleineren Mengen hergestellt werden, wird die Würfeldruckfestigkeit zwar ebenfalls kontrolliert, jedoch wegen der zu geringen Probenanzahl nicht statistisch ausgewertet.

3. Die Einrichtung des Betonlabors

Neben verschiedenen anderen, nicht direkt zur Prüfung der Betoneigenschaften dienenden Geräten sind im Labor die folgenden Geräte und Einrichtungen vorhanden:

- Prüfpresse zur Prüfung der Druckfestigkeiten an Würfeln der Grösse 10/10/10 cm
- Gerät zur Messung jeder beliebigen Konsistenz an Mörteln und Betonen
- Siebmaschine zur Aussiebung von Zuschlagstoffen
- Vibrationstisch zur Verdichtung von Beton in Würfelformen
- Gerät zur Messung der Mahlfeinheit des Zementes
- Verschiedene Betonprüfhämmer der Marke Schmidt
- Trocknungsgerät zum Trocknen von Zuschlagstoffen
- Temperaturregelbarer Wasserbehälter zur Lagerung von Betonwürfeln bei konstanter Temperatur
- Temperaturschreiber
- Feinmesswaagen

4. Die Durchführung der Kontrollen

4.1 Kontrolle der angelieferten Sand-Kies-Komponenten und des Zementes

Sand und Kies werden vom Kieswerk fertig vorgemischt in zwei Komponenten geliefert. Die Kontrolle besteht hier in einem Ist-Soll-Vergleich. Die aus Proben dieser Komponenten angefertigten Siebkurven müssen innerhalb der festgelegten Toleranzgrenzen von vorgegebenen Soll-Siebkurven liegen. Ist das nicht der Fall, so wird die betreffende Lieferung ausgeschieden.

Zur Kontrolle des Zementes wurde anfänglich jeden Monat eine aus der Anlieferung entnommene Probe an die EMPA eingesandt. Von dieser Probe wurden geprüft die Normenmörtelfestigkeiten nach 1, 2, 3, 7 und 28 Tagen und die Mahlfeinheit des Zementes. Die Bestimmung der Mahlfeinheit erfolgte durch Messung der «spezifischen Oberfläche nach Blaine». Die Auswertung der EMPA-Resultate zeigte, dass für den hochwertigen Portlandzement (HPC) zwischen Mahlfeinheit und Erhärtungsgeschwindigkeit ein eindeutiger Zusammenhang besteht. Bei Abweichungen der Mahlfeinheit von ihrem im Mittel vorhandenen Wert ändern sich vor allem die Normenmörtelfestigkeiten nach 1, 2 und 3 Tagen, und damit auch die Würfeldruckfestigkeit des Betons ganz erheblich. Deshalb erlaubt die Kenntnis der Mahlfeinheit eine ziemlich sichere Prognose über die zu erwartende Festigkeitsentwicklung in den ersten Tagen nach dem Betonieren.

Diese Tatsache ist für die Vorfabrikation von grosser Bedeutung, da zur Einhaltung des Produktionsrhythmus die für das Vorspannen und Transportieren erforderliche Festigkeit stets nach der gleich langen Erhärtungszeit (im allgemeinen nach 2 bis 3 Tagen) erreicht werden soll. Zur Eigen-Überwachung des Zementes wurde daher die sehr rasch und einfach durchführbare Kontrolle der Mahlfeinheit eingeführt, auch hier wieder ein Ist-Soll-Vergleich: wird der festgelegte Mindestwert nicht erreicht, so wird die Lieferung nicht angenommen. Zur zusätzlichen Fremd-Überwachung werden in grösseren Zeitabständen Proben an die EMPA gesandt, an denen ebenfalls die Mahlfeinheit sowie die Zement-Normenmörtelfestigkeiten nach 1, 2 und 28 Tagen geprüft werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch die Kontrolle von Sand-Kies und von Zement keine direkte Qualitätsverbesserung dieser Komponenten, sondern nur die Ausscheidung von Lieferungen ermöglicht wird, die einer bestimmten, vereinbarten Qualitätsanforderung nicht entsprechen.

4.2 Kontrolle und Steuerung der Konsistenz des Frischbetons

In der Kontrolle und Steuerung der Konsistenz des Frischbetons liegt nach den unter 3. gemachten Bemerkungen die einzige Möglichkeit, bei der Betonherstellung die Qualität direkt zu steuern. Die Steuerung der Konsistenz, d.h. ihre Konstanthaltung erfolgt durch Einsatz eines Automaten zur Dosierung der Gesamtwaermenge in Verbindung mit laufenden Konsistenzkontrollen. Der Dosierautomat wird dabei stets so eingestellt, dass die Soll-Konsistenz des jeweiligen Betontyps vorhanden ist.

Voraussetzung zur Konsistenzkontrolle ist

ein Messgerät, das den folgenden Anforderungen genügt:

- geringer Zeitaufwand zur Durchführung einer Messung
- gute Reproduzierbarkeit, also kleine Streuungen bei mehrmaliger Wiederholung einer Messung.
- deutliches Ansprechen auf Änderungen des Wassergehaltes in der Mischung.
- Messverfahren, das persönliche Einflüsse des Bedienungspersonals ausschaltet.
- Es sollen nach Möglichkeit alle Konsistenzbereiche von «steif» bis «fast flüssig» mit dem selben Gerät messbar sein.

Da keines der in der Praxis im Einsatz stehenden Geräte diesen Wünschen entsprach, wurde ein eigenes Messgerät entwickelt, welches den genannten Anforderungen voll entspricht. Dieses als LEBA*- Gerät bezeichnete Konsistenzmessgerät ist eine Weiterentwicklung des in Deutschland sehr häufig verwendeten Gerätes zur Durchführung der «Ausbreitprobe» nach DIN 1048. Mit ihm kann die Konsistenz von Frischbeton eindeutig definiert und sehr genau gemessen werden. Das LEBA-Konsistenzmessgerät (Bild 2) besteht aus einem Vibrationstisch, einer darauf befestigten Kegelform mit zylindrischem Aufsatz und einem Steuergerät. Zur Messung der Konsistenz wird die Kegelform bis Oberkante Aufsatz mit Frischbeton

* Benannt nach D. Leeb und Dr. H. Bachmann, welche das Gerät entwickelt haben.

Bild 2. LEBA-Konsistenz-Messgerät



gefüllt, der anschliessend durch Vibration vollkommen verdichtet wird. Danach werden Kegelform und Aufsatz entfernt und der frei auf der Tischplatte stehende kegelförmige Betonkuchen wird nochmals während einer bestimmten Zeitspanne vibrirt. Dabei fliesst er auseinander und breitet sich aus. Der Durchmesser der ausgebreiteten Probe wird gemessen und stellt das Mass für die Konsistenz dar.

Durch die Anwendung der Vibration sowohl zur Vorverdichtung als auch zum anschliessenden Ausbreiten bzw. Verformen des Betonkuches gelingt es, auch die Konsistenz sehr steifer Betone zu messen. Die Daten der Schwingung, Amplitude und Frequenz, sind genau definiert. Durch das dem Gerät angeschlossene Steuergerät wird die Schwingung unabhängig von Netzspannungsschwankung sowie Belastung und Lagerung des Vibrationstisches stets auf dem Sollwert gehalten. Die Steuereinrichtung ist eine wesentliche Voraussetzung für die außerordentlich kleinen Messfehler des LEBA-Konsistenzmessgerätes.

Unter der schon erwähnten Voraussetzung, dass sich die Bestandteile der Betonmischung in Menge und Zusammensetzung nicht bzw. nur geringfügig ändern, wird durch die Konstanthaltung der Konsistenz der W/Z-Faktor indirekt gesteuert. Die eigentliche Kontrolle des W/Z-Faktors selbst wird in grösseren Zeitspannen ebenfalls indirekt durchgeführt. Sie besteht darin, dass die Festigkeiten und das Konsistenzmass von

Probewürfeln einer Labormischung, die genau nach dem Rezept des betreffenden Betontyps mit dem rechnerisch zugrundegelegten W/Z-Faktor hergestellt wird, mit den entsprechenden Werten einer an der Mischmaschine entnommenen Probe verglichen werden.

4.3 Kontrolle der Absenkfestigkeiten

Die Kontrolle der Absenkfestigkeit wird mit dem Schmidt-Rückprallhammer durchgeführt. Die zum Hammer mitgelieferten Eichkurven konnten nicht verwendet werden, da weder Maximalkorngroesse noch Alter des Betons bei der Prüfung mit den dort zugrundegelegten Werten übereinstimmen. Deshalb wurden eigene Eichkurven aufgestellt, die sich durch Auswertung von Hammerprüfungen an anschliessend in der Prüfpresse zerdrückten Würfeln ergaben. Für die Kontrolle der Absenkfestigkeiten sind durch eine detaillierte, nach den hauptsächlichsten Elementtypen gegliederte Prüfanweisung festgelegt:

- die Elemente, die innerhalb einer Spannbetriebe zu prüfen sind
- die Prüfstellen an den einzelnen Elementen
- die Anforderungen an die Betonoberfläche bei der Prüfstelle
- das zu verwendende Hammermodell, Schlagrichtung und Schlagschema
- die Kriterien für die Freigabe der Elemente zum Absenken.

Sind die geforderten Bedingungen nicht erfüllt, so bleiben die Elemente mindestens 12 zusätzliche Stunden zur weiteren Erhärtung auf dem Spannbett, bevor die Kontrolle noch-

Bild 3. Häufigkeitsdiagramm der 28-Tage-Festigkeitswerte des Standardbetons B (Oktober 1962 bis September 1968)

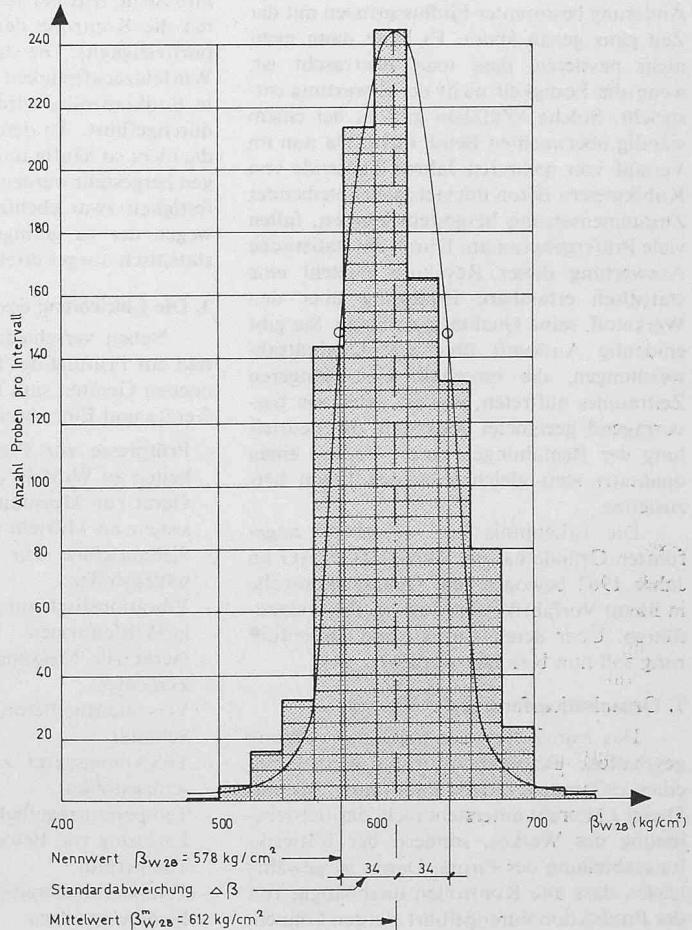


Tabelle 1. Monatsergebnisse Okt. 1963 bis Sept. 1964

Monat	Proben-anzahl	Mittel-wert	Standard-abweichung	Nenn-wert
	<i>n</i>	β_w^m 28	$\Delta\beta$	β_w 28
		kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²
Okt. 63	19	603	29	574
Nov.	26	611	31	580
Dez.	16	625	35	590
Jan. 64	19	608	33	575
Feb.	17	650	37	613
März	25	646	31	615
April	26	623	29	594
Mai	20	631	31	600
Juni	21	620	34	586
Juli	20	580	35	545
Aug.	17	600	36	564
Sept.	17	609	26	583
Gesamtprobenanzahl: 243				
Jahresmittel Oktober 1963/September 1964				
β_w^m	618 kg/cm ²	Mittelwert		
$\Delta\beta$	37 kg/cm ²	Standardabweichung		
β_w 28	581 kg/cm ²	Nennwert		

mals durchgeführt wird. Dieses Vorgehen bietet Gewähr, dass die Übertragung der Vorspannkraft auf den Beton erst erfolgt, nachdem dieser eine genügende Festigkeit erreicht hat.

4.4 Statistische Kontrolle der 2- 3- 7- und 28-Tage Würfeldruckfestigkeiten des Standardbetons B

a) Probeentnahme und Lagerung der Prüfkörper.

Vom Standardbeton B werden täglich (ausser Donnerstag) 2 Proben entnommen, und zwar in der Regel die 1. Probe bald nach Betonierbeginn und die 2. Probe kurz vor Betonierende. Von jeder Probe wird eine Würfelform mit 3 Probewürfeln der Abmessungen 10/10/10 cm gefüllt. Die Verdichtung der Proben dauert 3 Minuten und erfolgt auf einem Vibrationstisch. Die Lagerung nach dem Ausschalen erfolgt für die 2- 3- und 7-Tage-Würfel in der Fabrikationshalle auf einem Holzrost und für die 28-Tage-Würfel in feuchtem Sand bei einer Temperatur von 18 °C.

b) Prüfung.

Zur Ermittlung der Druckfestigkeiten der Probewürfel wird die folgende Aufteilung eingehalten: nach 2, 3 und 7 Tagen werden je rund 22% aller Würfel geprüft und nach 28 Tagen ca 33%. Je Prüftermin wird 1 Würfel geprüft. Würfel, die aus ein und derselben Würfelform, d.h. aus der gleichen Mischung stammen, werden also in verschiedenem Alter geprüft. Diese Regelung ergibt die maximal möglichen Festigkeitsstreuungen.

Der 10er-Würfel als Probekörpergrösse wurde u.a. gewählt, um bei Versuchsmischungen im Labor mit kleinen Betonmengen möglichst viele Würfel herstellen zu können und um die Abmessungen der Prüfpresse klein zu halten. Der Vergleich der Festigkeitswerte zwischen 10er- und 20er-Würfeln gibt für die Zusammensetzung der verwendeten Betonarten (Maximalkorn 18 mm statt normalerweise 30 mm) praktisch keine Unterschiede.

c) Resultate der Prüfung

Die Würfeldruckfestigkeiten nach 2, 3 und 7 Tagen liefern Angaben über die in einem Vorfabrikationswerk besonders wichtige Festigkeitsentwicklung des jungen Betons, während die 28-Tage-Festigkeit für den Vergleich mit der Norm herangezogen wird. (Aus Platzgründen werden im folgenden nur Resultate der 28-Tage-Festigkeitswerte bekanntgegeben.)

Die Ermittlung des Nennwertes der Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen erfolgt nach den folgenden Formeln (siehe auch SIA-Norm Nr. 162, Art. 9.07):

Nennwert

$$\beta_w 28 = \beta_w^m 28 - \Delta\beta$$

$$= 16\% \text{ Fraktile}$$

$$\beta_w^m 28 = \frac{\sum \beta_w^i 28}{n}$$

= Standardabweichung

$$\Delta\beta = \sqrt{\frac{\sum (\beta_w^m 28 - \beta_w^i 28)^2}{n-1}}$$

= Mittelwert

$\beta_w^i 28$ = einzelner Prüfwert

n = Anzahl der Proben

Die Würfeldruckfestigkeiten werden im allgemeinen monatlich ermittelt, sodann nach Ablauf eines Jahres zusammengefasst zu jährlichen Werten, welche alle jahreszeitlich bedingten Einflüsse (Temperatur, Werksauslastung usw.) enthalten.

In Tabelle 1 werden zunächst als Beispiel über die Festigkeitsentwicklung des Betons innerhalb eines Jahres die Resultate des Zeitraumes Oktober 1963 bis September 1964 gezeigt. Zum Vergleich über die Grössenordnung der Standardabweichung beim Beton sei noch der Vorschlag von Prof. Rüsch angeführt, der aufgrund einer internationalen Umfrage erarbeitet wurde [6]. Das Häufigkeitsdiagramm (Bild 3) zeigt die gesamten Resultate der 28-Tage-Würfeldruckfestigkeiten seit Einführung der Qualitätskontrolle im Jahr 1962.

Der Nennwert als Ausgangsbasis zur Ermittlung der zulässigen Spannungen im Beton (nach SIA-Norm Nr. 162, Art. 3.06 und 5.08) beträgt somit:

$$\beta_w 28 = 578 \text{ kg/cm}^2$$

Gemäss Art. 2.05 der Norm Nr. 162 darf aus-

Tabelle 3. Jahresergebnisse Okt. 1962 bis Sept. 1968

Jahr	Proben-anzahl	Mittel-wert	Standard-abweichung	Nenn-wert
		kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²
62-63	188	604	42	562
63-64	243	618	37	581
64-65	190	614	33	581
65-66	164	613	35	578
66-67	145	608	29	579
67-68	130	613	25	588

serdem für Beton BS ($\beta_w 28 \geq 375 \text{ kg/cm}^2$) kein Prüfwert den Mindestwert von 85% des Nennwertes unterschreiten.

$$\min \beta_w^i 28 \geq 0,85 \cdot 578 = 492 \text{ kg/cm}^2$$

Aus dem Häufigkeitsdiagramm ist zu ersehen, dass von 1060 Proben nur ein einziger Wert unter 500 kg/cm² liegt und die Anforderung somit als erfüllt betrachtet werden kann.

Da das über den Gesamtzeitraum von 6 Jahren dargestellte Häufigkeitsdiagramm nichts über die in jedem einzelnen Jahr erreichten Festigkeitswerte aussagt, werden diese zusätzlich in Tabelle 3 angeführt. Die Resultate zeigen, dass die Betonqualität, hier gekennzeichnet durch Mittelwert und Standardabweichung, im Zeitraum vom 6 Jahren unverändert auf dem gleich hohen Stand gehalten werden konnte.

Die sehr geringen Streuungen (Standardabweichung $\Delta\beta$) in den Festigkeitswerten be- weisen die Brauchbarkeit der Methode, die Betonqualität über die Konstanthaltung der Konsistenz des Frischbetons zu steuern.

V. Zusammenfassung

Im ersten Teil dieses Berichtes werden in kurzer Form einige sehr häufig verwendete statistische Kriterien zur Beurteilung von streuenden Qualitätseigenschaften angegeben. Im Anschluss daran erfolgt ein Hinweis auf die verschärften Anforderungen an die Güte des Betons gemäss den Bestimmungen der neuen SIA-Norm Nr. 162 [2].

In ausführlicher Form wird auf die Besonderheiten der Qualitätskontrolle beim Be-

Tabelle 2. Vorschlag für eine Abschätzung der Standardabweichung (in kg/cm²) bei einer mittleren Betonfestigkeit von 250-600 kg/cm² nach Rüsch

Sorgfalt bei der Überwachung	Kleine Baustelle		Mittlere Baustelle		Grossbaustelle	
	keine	Betonproben	Zumessung	nach Volumen	Überwachung	durch Beton-Ing.
Einfluss der Witterung						
	gross	klein	gross	klein	gross	klein
sehr gut	60	50	50	40	40	30
gut	70	60	60	50	50	40
annehmbar	80	70	70	60	60	50

ton eingegangen. Es wird gezeigt, wie der Wasser-Zement-Wert als wichtigste Einflussgrösse auf die Betonfestigkeit unter Einhaltung bestimmter Voraussetzungen über die Konstanthaltung der Konsistenz des Frischbetons gesteuert werden kann. Im letzten Abschnitt wird die Qualitätskontrolle des Betons im Vorfabrikationswerk der Stahlton AG beschrieben, und es werden Resultate der statistischen Kontrolle von Würfeldruckfestigkeiten für einen Prüfzeitraum von 6 Jahren mitgeteilt.

Literaturangaben:

- [1] Rüsch H., Über die zweckmässigste Art der Güteprüfung und ihren Einfluss auf die Baukosten
«B. u. Stb.» 1958, Heft 3, S. 56
- [2] SIA-Norm Nr. 162 (Ausgabe 1968), Norm für die Berechnung und Ausführung von Bauwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton
- [3] Blaut H., Statistische Verfahren für die Gütesicherung von Beton. Bauverlag 1968

- [4] «Cementbulletin», 1968, Nummer 7, Über die Qualitätsüberwachung beim Beton
- [5] Walz K., Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften
2. Auflage 1963, Ernst & Sohn, Berlin
- [6] Rüsch H., Zur statistischen Qualitätskontrolle des Betons
«Materialprüfung» 6, 1964, Nr. 11

Adresse der Verfasser: D. Leeb und O. Liechti, Bauingenieure, Stahlton AG, Riesbachstrasse 57, 8034 Zürich, Postfach

DK 628.112.15

Aus der Praxis des Horizontalbrunnenbaues

Von R. Blasche, dipl. Ing. SIA, Bern

Vortrag, gehalten an der Tagung der Schweiz. Gesellschaft für Bodenmechanik und Fundationstechnik am 2. Mai 1969 in Neuenburg

Eine Definition des Begriffes Horizontalfilterbrunnen finden wir in der DIN 4046. Danach ist ein Brunnen ein künstlich hergestellter Aufschluss zur Gewinnung von Grundwasser und, als Unterbegriff, der Horizontalfilterbrunnen ein Schacht mit waagrecht liegenden Strängen aus Brunnenrohren, womit gelochte oder geschlitzte Rohre zur Wasseraufnahme oder vollwandige Rohre gemeint sind.

1. Der Schacht

Primär erfolgt die Erstellung des Schachtes, die im Prinzip der aus dem Grundbau bekannten Brunnengründung entspricht. Zu Beginn des Horizontalbrunnenbaues wurde verschiedentlich das Absenken noch im Druckluftverfahren (als Caisson) vorgenommen. Heute geschieht dies fast ausschliesslich durch Absenken als offener Senkkasten. Die Entnahme des Bodens innerhalb des Schachtes und der dabei auftretende Grundbruch bewirken das Absenken des Schachtes. Die dabei wirkenden Kräfte sind:

- das Eigengewicht (unter Berücksichtigung des Auftriebes),
- die Mantelreibung und
- die Schneidenreaktion.

Das nach Abzug des Auftriebes verbleibende Eigengewicht muss während jeder Absenkphase grösser sein, als die ihm entgegenwirkenden anderen Kräfte. Wie können wir dieses Kräfteverhältnis beeinflussen?

Ein recht wirksames Verfahren zur Verminderung und sogar völligen Ausschaltung der Mantelreibung ist uns mit der Anwendung thixotroper Flüssigkeiten gegeben. Verwendet wird hierzu vorwiegend Bentonit. Von den Schlitzwandlerarbeiten und Tiefbohrungen ist uns die Stützwirkung solcher Tonsuspensionen geläufig. Bei der Umhüllung des Senkschachtes mit einem thixotropen Flüssigkeitsmantel geschieht das gleiche. Der Schmiermantel liegt wie ein dünner «Schlitz» um den Schacht und verhindert dabei das Wirksamwerden der Reibung zwischen Boden und Schachtwand. Für Aufbau und Erhaltung des Flüssigkeitsmantels ist es zweckmässig, den Schachtfuss etwa 5 cm breiter auszuführen (Bild 1).

Unter thixotropen Tonen versteht man solche, die unter mechanischen Einflüssen aus einem labil-festen in einen flüssigen Zustand überwechseln, und zwar ohne Plastizitätsgrenze. Diese Eigenschaft kommt gerade bei der Senkschachterstellung zu gute, da der Absenkvgang durch die abschnittsweisen Betonierarbeiten ständig unterbrochen werden muss.

Die zweite dem Schachtgewicht entgegenwirkende Kraft ist die Schneidenreaktion. Ihre Grösse kann nur wenig oder gar nicht beeinflusst werden. Um sie ganz aufzuheben, wäre es notwendig, die Schneide völlig freizulegen, was bei einem Unterwasseraushub unmöglich ist. Die praktische Einflussnahme ist daher auf die Ausbil-

dung der Schneide selbst begrenzt. Schneidenbreite, Schneidenwinkel sowie Form und Stärke der Panzerung müssen bestimmt werden (Bild 2). Der Schneidenwinkel sollte nach unseren Erfahrungen nicht grösser als 25 bis 30° gewählt werden. Die Schneidenbreite ist dagegen mit der Form der Panzerung verknüpft. Die Frage der Schneidenpanzerung wird in der Praxis der Unternehmung überlassen. Je nach Form und Materialaufwand können die Kosten für ihre Herstellung erheblich schwanken. Dabei hat gerade die Form der Schneidenpanzerung in Abhängigkeit von den zu durchfahrenden Bodenschichten beträchtlichen Einfluss auf die Absenkarbeiten.

Um ein möglichst hohes Gewicht zu erhalten, werden die Schachtwandungen stark ausgebildet, wobei 25 bis 50 cm üblich sind. Hinsichtlich der Armierung ist besonders auf eine ausreichende Längsarmierung zu achten. Sobald zum Beispiel ein Schacht auf ein Hindernis stößt oder gegen Abweichung aus der Lotrechten versperrt werden muss, treten in der Schachtwand Längskräfte auf, deren Grösse nicht in jedem Fall vorher bestimmt werden können. Die durchgehende Längsarmierung ist auch notwendig, wenn ein Schacht aus Fertigelementen hergestellt werden soll. Bei ungenügendem Schachtgewicht, wenn also ein Schacht während des Absenkens hängen bleibt, kann zusätzliche Belastung helfen.

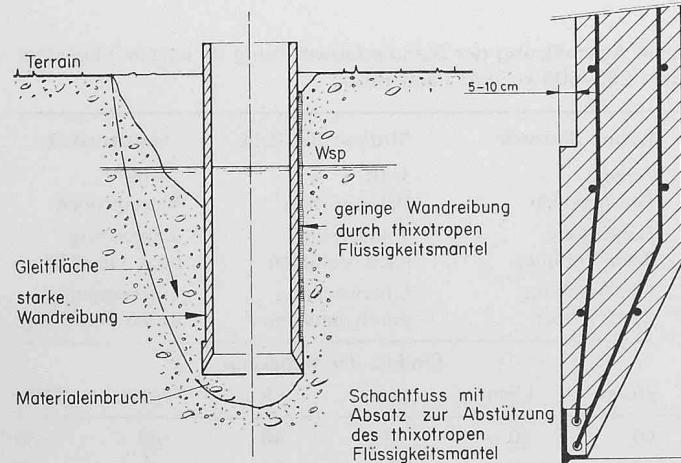


Bild 1. Schachtabsenkung mit thixotropem Flüssigkeitsmantel

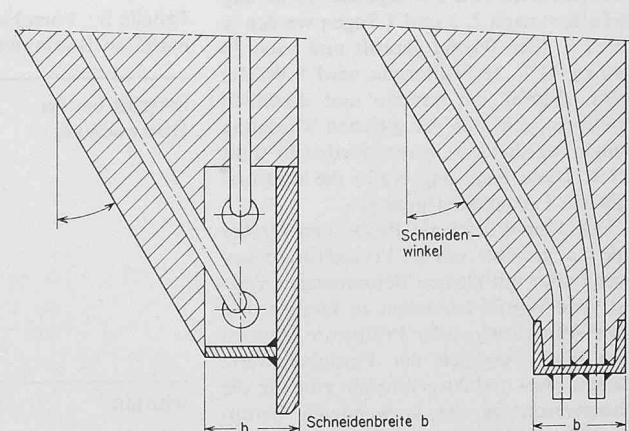


Bild 2. Schachtschneiden und ihre Panzerung