

## "Schutz und Instandsetzen von Betonbauteilen"

### 1. Beton

#### 1.1 Allgemeines, Begriffe:

Beton im Sinne der Norm DIN 1045 ("Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung") wird hergestellt aus Zement, Betonzuschlag und Wasser. Zur Erzielung bestimmter Eigenschaften können auch Betonzusätze zugegeben werden.

Das Gemisch aus Zement und Wasser wird als "Zementleim" des Frischbetons bzw. im erhärteten Zustand als "Zementstein" des Festbetons bezeichnet. Dieses Gemisch bewirkt das Zusammenhaltevermögen und die Verarbeitbarkeit der Frischbetonmischung sowie die Ver kittung der Zuschlagkörner und damit die wesentlichen Eigenschaften des erhärteten Betons.

Beton kann also als Zweistoffsystem betrachtet werden, dessen Eigenschaften beeinflußt werden von:

- den Eigenschaften des Zementsteins,
- den Eigenschaften des Zuschlags
- und der Haftung und dem Zusammenwirken zwischen Zementstein und Zuschlag.

In seiner wesentlichen Anwendung als bewehrter Beton haben wir den Verbundbaustoff Stahlbeton, dessen Eigenschaften wiederum abhängen von den Eigenschaften des Betons, den Eigenschaften des Stahls und dem Verbundverhalten zwischen Beton und Stahl.

Die Zusammensetzung der Betonbestandteile und die Eigenschaften der Ausgangsstoffe müssen daher auch abgestimmt sein auf die Erfordernisse der Anwendung als Stahlbeton oder als Spannbeton.

Wichtige Begriffe und Unterscheidungsmerkmale der Betonarten sind im Heft "Beton - Herstellung nach Norm" der Bauberatung Zement des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie (Beton-Verlag Düsseldorf auf den Seiten 15 bis 20) zusammengestellt, und zwar:

- nach der Trockenrohichte
- nach dem Herstellverfahren
- nach dem Erhärtungszustand
- nach dem Ort des Herstellens
- nach dem Ort des Einbringens
- nach dem Einfluß der Witterung
- nach der Frischbeton-Konsistenz
- nach der Festigkeit

Weitere Bezeichnungen unterscheiden den Beton nach der Art des Förderns, des Verarbeitens und der Verdichtung (z.B. Pumpbeton, Spritzbeton, Unterwasserbeton, Stampfbeton, Rüttelbeton, Schleuderbeton, Walzbeton, Preßbeton, Vakuumbeton) oder nach besonderen Eigenschaften für spezielle Anwendungen (z.B. wasserundurchlässiger Beton, Beton mit hohem Frostwiderstand, Beton mit hohem Frost- und Tausalz-widerstand, Beton mit hohem Widerstand gegen chemische Angriffe, Beton mit hohem Verschleißwiderstand, Beton für hohe Gebrauchstemperaturen bis 250°C) sowie für architektonische Gestaltungszwecke (z.B. Sichtbeton, Waschbeton, Strukturbeton).

Häufiger vorkommende Betonarten mit besonderen Eigenschaften sind im Heft "Beton - Herstellung nach Norm" auf den Seiten 25 bis 27 erläutert.

#### 1.2 Ausgangsstoffe

### 1.2.1 Zement

Zement ist ein feingemahlendes, hydraulisches Bindemittel für Mörtel und Beton, das in Verbindung mit Wasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser erhärtet und fest bleibt. In DIN 1164 sind folgende 4 Haupt-Zementarten genormt:

- Portlandzement (PZ)
- Eisenportlandzement (EPZ)
- Hochofenzement (HOZ)
- Trasszement (TrZ)

Daneben sind in DIN 1164 Zemente mit besonderen Eigenschaften erfasst:

- HS-Zemente - mit hohem Sulfatwiderstand, bei Einwirkung betonangreifender Wässer und Böden
- NW-Zemente - mit niedriger Wärmeentwicklung, besonders für Massenbeton
- NA-Zemente - mit niedrigem, wirksamen Alkaligehalt, bei Verarbeitung alkaliempfindlicher Zuschläge.

Außerdem ist in DIN 1164, Teil 100, auch der Portland-Ölschieferzement (PÖZ) genormt, dessen Verwendung damit nach DIN 1045 für Beton und Stahlbeton gestattet ist. Weitere Zemente entsprechen nicht in allen Punkten der DIN 1164, sind aber für bestimmte Anwendungsbereiche bauaufsichtlich zugelassen. Hierzu zählen insbesondere die Flugaschezemente, die Traß-Hochofenzemente und die Portlandkalksteinzemente. Zu erwähnen sind noch: "Weißzement" (eisenoxydarmer Portlandzement), "Tonerdeschmelzzement" (Verwendung im Feuerungsbau, aber nicht für tragende Bauteile zugelassen), "Schnellzement" (für das Einsetzen von Dübeln und Ankern geeignet) sowie "Quellzement" (Mischung aus PZ, Hochofenschlacke und aluminat- und gipshaltigen Bestandteilen, wodurch ein künstlich erzeugtes Sulfatreiben entsteht). Die wichtigsten, in Deutschland verwendeten Zementarten sind im Heft "Beton - Herstellung nach Norm", Seiten 4 bis 7, zusammengestellt.

Der hauptsächlich verwendete Zement ist der Portlandzement (PZ) nach DIN 1164. Dieser besteht im wesentlichen aus mineralischen Verbindungen von Calciumoxyd und Silikaten, aber auch aus Verbindungen von Calciumoxyd und Tonerde (Aluminaten) und Eisenoxyd (Ferrit), die durch Sintern oder Schmelzen entstanden sind.

Die Rohstoffe für die Zementherstellung sind kalk- und tonreiche Gesteine, wie Kalkstein, Lehm, Ton, Schiefer, Kalk und Tonmergel und andere.

Die Herstellung erfolgt durch Mahlen der Rohstoffe, anschließendem Sintern bei Temperaturen über 1250°C (z.B. in Drehöfen) und nach dem Abkühlen durch Mahlen des beim Sintern entstandenen Klinkers unter Zugabe von geringen Mengen Gips als Erstarrungsverzögerer. Die Korngrößen des Zements liegen im Regelfall unter 1/1000 mm, die Mahlfeinheit wird nach der spezifischen Oberfläche aller Körner in einem Gramm Zement bestimmt, die zwischen 2000 cm<sup>2</sup> (grober Zement) und 7000 cm<sup>2</sup> (sehr feiner Zement) liegt. Die Mahlfeinheit von PZ 35 liegt zwischen 2800 cm<sup>2</sup>/g und 4000 cm<sup>2</sup>/g.

Wichtigstes Unterscheidungsmerkmal gegenüber Bindemitteln aus gebrannten hydraulischen Kalken ist der Hauptbestandteil des PZ - Klinkers, das Tricalciumsilikat, welches zu etwa 50% im Portlandzement enthalten ist.

Die Erhärtung des Zements erfolgt durch die chemische Reaktion mit Wasser. Diesen Vorgang nennt man Hydratation.

Der Zement entwickelt nach der Wasserzugabe ein dichter werdendes, stabiles Gefüge. Aus den Zementkörnern und dem Anmachwasser (Zementleim) entstehen zunächst faserförmige Mikrokristalle, die in den Wasserraum, der das einzelne Zementkorn zunächst umgibt, hineinwachsen, so dass schließlich ein zusammenhängendes Gefüge entsteht. Die Festigkeit und die Dichtigkeit des so entstehenden Zementsteins hängen davon ab, dass möglichst die Wassermenge zugegeben wird, die zur Umwandlung aller Zementkörner zu Zementstein benötigt wird. Die ideale Wassermenge wäre 40% des Zementgewichts, denn ca. 25% werden chemisch beim Aufbau der Mikrokristalle gebunden und weitere 15%

werden in sehr feinen Mikroporen des entstandenen Zementsteins eingeschlossen (physikalisch gebunden).

Das heißt, der Zement benötigt zur vollständigen Hydratation einen Wasser-Zement-Wert von  $w/z = 0,4$ .

Ist der Wasser-Zement-Wert größer als 0,4 (abgekürzt geschrieben:  $w/z = 0,4$ ), so kann der überschüssige Wasseranteil nicht chemisch oder physikalisch gebunden werden. Es bleiben Wasserinseln im Gefüge, die nach der Verdunstung dieses Wassers noch zusätzliche Kapillarporen hinterlassen. Diese weisen einen wesentlich größeren Durchmesser auf als die geschlossenen Mikroporen im Zementstein. Dadurch wird der Zementstein poröser, die Dichtigkeit und die Festigkeit werden herabgesetzt.

Ist der Wasser-Zement-Wert kleiner als 0,4 ( $w/z < 0,4$ ), so ist keine vollständige Hydratation möglich, da das chemisch benötigte Wasser für einen Teil der Zementkörner fehlt. Die Festigkeit des so entstandenen Zementsteins steigt zwar bei Laborversuchen noch etwas an, weil auch die Porosität noch etwas abnimmt, aber in der Praxis sind Betonmischungen mit  $w/z$  unter 0,4 nur schwer oder nicht mehr verarbeitbar.

Aus Gründen der besseren Verarbeitbarkeit sind daher Wasser-Zement-Werte über 0,4 üblich und erforderlich, jedoch sind zur Sicherstellung einer ausreichenden Festigkeit und Dichtigkeit die Höchstwerte der  $w/z$  – Werte entsprechend der DIN 1045 zu beachten. Zementgehalte und  $w/z$  - Werte nach DIV 1045 können dem Heft "Beton - Herstellung nach Norm", Seiten 21 bis 27 entnommen werden.

Die Festigkeiten des Zementsteins, geprüft an Mörtelmischungen nach DIN 1164, Teil 7, aus einem Gewichtsteil Zement, drei Gewichtsteilen Normsand und 0,5 Gewichtsteilen Wasser, sind z.B. auf Seite 5 des Heftes "Beton - Herstellung nach Norm" in  $N/mm^2$  angegeben, d.h. aufgebrachte Last vor dem Bruch geteilt durch die belastete Mörtelfläche in Newton pro Quadratmillimeter. Die Festigkeitsklassen Z25, Z35, Z45 und Z55 geben die Mindestfestigkeit im Alter von 28 Tagen an. Wichtig ist auch die Festigkeitsentwicklung des Zementsteins. Bei den Festigkeitsklassen Z35 und Z45 unterscheidet die DIN 1164 zwischen Zementen F mit höheren Anfangsfestigkeiten und Zementen L mit langsamerer Anfangserhärtung, die aber bei sorgfältiger Nachbehandlung etwas besser nacherhärten.

#### 1.2.2 Zuschlag

Zuschlag für Beton nach DIN 4226 ist ein Gemenge von Körnern aus natürlichen oder künstlichen mineralischen Stoffen. Man unterscheidet Zuschlag mit dichtem Gefüge (DIV 4226, Teil 1) und Zuschlag mit porigem Gefüge (Teil 2).

Zuschlag mit dichtem Gefüge wird im Regelfall für Normalbeton (Kornrohddichten über  $2,5 \text{ kg/dm}^3$ ), Zuschlag mit porigem Gefüge (Kornrohddichte meist unter  $1,5 \text{ kg/dm}^3$ ) für Leichtbeton verwendet.

Die Zuschlagkörner müssen so fest sein, dass sie die Herstellung eines Betons mit der geforderten Festigkeit ermöglichen. Der Zuschlag darf bei Wassereinwirkung nicht erweichen, sich nicht zersetzen, mit den Zementbestandteilen keine schädlichen Verbindungen eingehen und den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht beeinträchtigen.

Die Kornform soll möglichst gedrunken (kugelig, würfelig) sein. Ungünstig sind Körner mit einem Verhältnis von Länge zu Dicke größer als 3:1. Ihr Anteil ist zu begrenzen.

Für Beton nach DIN 1045 sind Zuschlaggemische mit 8, 16, 31,5 oder 63 mm Größtkorn zu verwenden. Das Zuschlaggemisch soll möglichst grobkörnig, hohlraumarm und nicht zu sandreich sein, so dass es einen möglichst geringen Wasser- und Zementleimbedarf aufweist, aber noch einen Beton mit ausreichender Verarbeitbarkeit ergibt.

Die Kornzusammensetzung des Betonzuschlags wird durch Sieblinien und - wenn nötig - durch einen darauf bezogenen Kennwert für die Kornverteilung oder den Wasseranspruch gekennzeichnet. Die Sieblinien nach DIN 1045 gehen bis zur Korngröße 0,125 mm (Mehlkorn), Die Kornzusammensetzung kann stetig sein oder unstetig (Ausfallkörnungen). Sie muß stetig sein bei Beton B I ohne Eignungsprüfung. Bei Beton mit Eignungsprüfung (B I oder B II) dürfen auch Ausfallkörnungen angewendet werden. Die Kornzusammensetzung muß aber der maßgebenden Eignungsprüfung entsprechen.

Die Bezeichnungen des Zuschlags, die Anforderungen an das Zuschlaggemisch, die Sieblinien der DIN 1045, Richtwerte für den Wasseranspruch, den Mehlkorn- und Feinstsandgehalt und die Rohddichte des Zuschlags sowie die besonderen Bezeichnungen

bei erhöhten oder verminderten Anforderungen an den Zuschlag sind dem Heft "Beton - Herstellung nach Norm", Seiten 8 bis 14 zu entnehmen

#### 1.2.3 Wasser:

Der Wassergehalt  $w$  einer Betonmischung setzt sich aus der Oberflächenfeuchte des Zuschlags und dem Zugabewasser zusammen. Die erforderliche Zugabewassermenge ist also bei sonst gleichen Bedingungen um so geringer, je größer die Oberflächenfeuchte der Zuschlagkörner ist. Die Gesamtwassermenge einer Betonmischung ist noch etwas größer als der Wassergehalt  $w$ , wenn man die Kernfeuchte (oder Porenfeuchte) berücksichtigt, die sich im Innern der Zuschlagkörner aufhält. Dieser Anteil wirkt sich aber auf den Wasser-Zement-Wert und auf die Konsistenz einer Betonmischung nicht aus, d.h. er wird bei der Bestimmung des Wassergehalts  $w$  und des Wasser-Zement-Wertes nicht berücksichtigt.

Als Zugabewasser sind Leitungswasser und auch die meisten in der Natur vorkommenden Wässer geeignet. Wasser mit höherem Chloridgehalt ist, für Stahlbeton ungeeignet, weil der Korrosionsschutz der Bewehrung gefährdet wird. Bei Spannbeton und beim Einpressmörtel der Spannkäule darf im Wassergehalt  $w$  nicht mehr als 600 Milligramm Chlor je Liter enthalten sein.

Ebenso sind stark verunreinigte Wässer, insbesondere öl-, fett-, zucker- und humushaltige Wässer, nicht zur Betonherstellung geeignet.

#### 1.2.4 Betonzusätze:

Bei den Betonzusätzen unterscheidet man Zusatzstoffe und Zusatzmittel. Betonzusatzstoffe sind fein aufgeteilte Betonzusätze, die bestimmte Betoneigenschaften beeinflussen und als Volumenbestandteile zu berücksichtigen sind (z.B. Traß, Gesteinsmehl, Flugasche oder auch Pigmente zum Einfärben des Betons). Sie dürfen nur zugegeben werden, wenn sie das Erhärten des Zements, die Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons sowie den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht beeinträchtigen.

Die Zusatzstoffe müssen genormt sein (z.B. DIN 51043 (Traß) oder DIN 4226, Teil 1 (Gesteinsmehl) oder DIN 53237 (Pigmente)) oder eine Zulassung oder ein Prüfzeichen haben.

Farbpigmente nach DIN 53237 dürfen nur verwendet werden, wenn der Nachweis der ordnungsgemäßen Überwachung der Herstellung und Verarbeitung des Betons erbracht ist. Ein latentlydraulischer oder puzzolanischer Betonzusatzstoff darf bei der Festlegung des Mindestzementgehalts und gegebenenfalls des höchstzulässigen Wasser-Zement-Wertes nur berücksichtigt werden, soweit dies z.B. durch Prüfbescheid oder Richtlinien besonders geregelt ist.

Betonzusatzmittel sind Betonzusätze, die durch chemische oder physikalische Wirkung oder durch beide die Betoneigenschaften, z.B. Verarbeitbarkeit, Erstarren oder Erhärten, ändern. Als Volumenanteil des Betons sind sie ohne Bedeutung.

Für Beton und Zementmörtel - auch zum Einsetzen von Verankerungen - dürfen nur Betonzusatzmittel mit gültigem Prüfzeichen und nur unter den im Prüfbescheid angegebenen Bedingungen verwendet werden.

Chloride, chloridhaltige oder andere, die Stahlkorrosion fördernde Stoffe dürfen Stahlbeton, Beton und Mörtel, der mit Stahlbeton in Berührung kommt, nicht zugesetzt werden.

Beton, der durch Zugabe verzögernder Betonzusatzmittel eine um mindestens drei Stunden verlängerte Verarbeitbarkeitszeit aufweist, ist als Beton B II nach der "Vorläufigen Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (verzögerter Beton)" zusammenzusetzen, herzustellen und einzubauen.

Fließbeton und Beton mit Fließmittel sind entsprechend der "Richtlinie für Beton mit Fließmittel und für Fließbeton;

Herstellung, Verarbeitung und Prüfung" herzustellen und einzubauen. Bei Anwendung von Betonzusatzmitteln muß die Mindestzugabemenge 2 Milliliter pro kg Zement (bzw. 2 Gramm pro kg), die Maximalzugabemenge 50 ml/kg (bzw. 70 g/kg) betragen. Bei Zugabe mehrerer Betonzusatzmittel darf die Gesamtmenge 60 ml/kg (bzw. 60 g/kg) nicht überschreiten.

Hierbei dürfen, außer bei Fließmitteln, nicht mehrere Betonzusatzmittel derselben Wirkungsgruppe verwendet werden. Eine Übersicht über Wirkungsgruppen und Kennzeichnung der Betonzusatzmittel zeigt die folgende Zusammenstellung:

- Betonverflüssiger BV (gelb)
- Fließmittel FM (grau)
- Luftporenbildner LP (blau)
- Dichtungsmittel DM (braun)
- Verzögerer VZ (rot)
- Beschleuniger BE (grün)
- Einpreßhilfen EH (weiß)
- Stabilisierer ST (violett)

Flüssige Betonzusatzmittel sind dem Wassergehalt  $w$  bei der Bestimmung des Wasser-Zement-Wertes  $w/z$  dann zuzurechnen, wenn ihre gesamte Zugabemenge 2,5 Liter pro Kubikmeter verdichteten Betons oder mehr beträgt.

Bei einer Kombination mehrerer Betonzusatzmittel muß der Betonhersteller über eine Prüfstelle E verfügen.

Bei Transportbeton ist nach DIN 1045, 5.5.3 bei Zugabe von verzögernden Betonzusatzmitteln die Verarbeitungszeit auf dem Lieferschein anzugeben, ebenso Ort und Zeitpunkt der Fließmittelzugabe bei der Anwendung von Fließmitteln.

Bei der Verwendung von Betonzusätzen (Betonzusatzstoffe und/oder Betonzusatzmittel) sind bei Beton B I und B II stets Eignungsprüfungen durchzuführen.

1.3 Betoneigenschaften:

1.3.1 Eigenschaften des Frischbetons:

Voraussetzungen für das Erreichen der geforderten Festbetoneigenschaften sind: Gutes Zusammenhaltevermögen, gute Verarbeitbarkeit und gute Verdichtungsfähigkeit des Frischbetons.

Das Zusammenhaltevermögen hängt wesentlich von der Kornzusammensetzung und dem Mehlkorn- und Feinstsandgehalt ab.

Der Beton muß eine bestimmte Menge an Mehlkorn enthalten, damit er gut verarbeitbar ist und ein geschlossenes Gefüge erhält. Der Mehlkornanteil setzt sich zusammen aus dem Zement, dem im Zuschlag enthaltenen Kornanteil (0 bis 0,125mm) und gegebenenfalls dem Betonzusatzstoff. Besonders wichtig ist ein ausreichender Mehlkorngehalt bei Pumpbeton, bei Beton für dünnwandige, engbewehrte Bauteile und bei wasserundurchlässigem Beton. Ein zu hoher Anteil kann aber auch Eigenschaften des Festbetons, wie z.B. den Frostwiderstand, beeinträchtigen. Bei Beton für Außenbauteile sowie für Beton mit hohem Widerstand gegen Frost, Frost und Tausalz und auch gegen Verschleiß werden für Zuschlaggemische mit 16mm bis 63mm Größtkorn höchstzulässige Mehlkorngehalte sowie höchstzulässige Gehalte an Mehlkorn und Feinstsand bis 0,25mm in Abhängigkeit des Zementgehalts vorgegeben.

Die Konsistenz des Frischbetons ist ein Maß für die Verarbeitbarkeit. Es werden laut nachfolgender Punkte vier Konsistenzbereiche unterschieden.

- steif (KS)
- plastisch (KP)
- weich (KR)
- fließfähig (KF)

Beton mit der fließfähigen Konsistenz KF darf nur als Fließbeton unter Zugabe eines Fließmittels verwendet werden.

Die Verarbeitbarkeit des Frischbetons muß den baupraktischen Gegebenheiten angepaßt sein. Für Ortbeton der Gruppe B I ist vorzugsweise weicher Beton (KR) mit "Regelkonsistenz" oder fließfähiger Beton (KF) zu verwenden.

1.3.2 Eigenschaften des Festbetons:

Die Festbeton-Eigenschaften hängen wesentlich von der Dichtigkeit des Zementsteins ab. Daher sind in DIN 1045 Mindestwerte für den Zementgehalt und Höchstwerte für den Wasser-Zement-Wert  $w/z$  festgelegt.

Die Druckfestigkeit ist eine der Wichtigsten Betoneigenschaften. Sie wird ausgedrückt durch das Verhältnis von Widerstandskraft vor dem Bruch zur gedrückten Fläche und wird bei Betonwürfeln mit  $f_{w}$  (in Newton pro Quadratmillimeter) bezeichnet. Nach der Festigkeit werden 2 Gruppen unterschieden:

- Beton B I:  
Beton B I ist ein Kurzzeichen für Beton der Festigkeitsklassen B 5 bis B 25.
- Beton B II:  
Beton B II ist ein Kurzzeichen für Beton der Festigkeitsklassen B 35 und höher und in der Regel für Beton mit besonderen Eigenschaften.

Die Festigkeitsklasse des Betons gibt die Festigkeit in  $N/mm^2$  nach 28 Tagen an, die bei der Güteprüfung von jedem einzelnen Würfel mindestens erreicht werden muß. Dies ist die Nennfestigkeit  $f_{wN}$ .

Maßgebend sind immer Ergebnisse an 20 cm - Würfeln. Auch bei anderen Würfelgrößen oder bei Zylindern kann die Nennfestigkeit  $f_{wN}$ , die ein 20 cm - Würfel erreicht hätte, aus dem Prüfungsergebnis durch Umrechnung ermittelt werden.

Außerdem darf die mittlere Druckfestigkeit von 3 Prüfkörpern (Serie) die Serienfestigkeit  $f_{wS}$  nicht unterschreiten.

Bei Beton B I und B II, der für Außenbauteile verwendet wird, ist der Betonzusammensetzung ein Wasser-Zement-Wert  $w/z < 0,60$  zugrunde zu legen. Der Zementgehalt muß mindestens 300  $kg/m^3$  verdichteten Betons betragen; er darf auf 270  $kg/m^3$  ermäßigt werden, wenn Zement der Festigkeitsklassen Z 45 oder Z 55 verwendet wird oder wenn der Beton als B II Beton mit Eignungsprüfung hergestellt wird.

Eine weitere wünschenswerte Eigenschaft ist in vielen Anwendungsfällen auch eine hohe Biegezugfestigkeit. Sie kann mit besonderen Prüfverfahren ermittelt oder folgendermaßen grob abgeschätzt werden:

Bei niedrigen Betonfestigkeitsklassen ca. 15 % bei hohen Betonfestigkeitsklassen ca. 10 % der Druckfestigkeit.

Formänderungen kann der Beton erreichen durch:

- Belastung,
- Wasseraufnahme bzw. Wasserabgabe und
- Temperatureinflüsse.

a) Bei Belastung (Druck oder Zug) verkürzt oder verlängert sich der Beton. Unter nicht zu hohen Lasten gehen diese Verformungen bei Entlastung wieder zurück. Man bezeichnet sie auch als "elastische" Verformung, da die Verformung im Verhältnis der aufgetragenen Lastspannung steigt oder fällt. Das Verhältnis von Spannung zu Verformung nennt man "Elastizitäts - Modul" oder "E-Modul".

Bei höherer Belastung verhält sich der Beton nicht mehr elastisch, d.h. die auftretenden Verformungen gehen nach der Entlastung nicht mehr vollständig zurück. Bei dauernder Druckbelastung verkürzt sich der Beton im Laufe der Zeit zusätzlich zu seiner elastischen Verkürzung um ein weiteres Maß, welches nach Entlastung ebenfalls nicht wieder zurückgeht. Diese Verformung wird als Kriechverformung oder Kriechen bezeichnet.

Bei Kriechen des Betons kriecht i.a. nur der Zementstein, also ist das Kriechmaß um so geringer, je kleiner der Zementsteinanteil und je größer der Zuschlaganteil der Betonmischung ist. Außerdem ist das Kriechen bei niedrigem  $w/z$  - Wert (dichterer und festerer Zementstein) sowie bei höherem Betonalter (zum Zeitpunkt der Belastung) geringer.

b) Wasserabgabe beim Austrocknen des Betons bedeutet eine Volumenverringerung, d.h. eine Verkürzung. Diese Verkürzung wird Schwinden genannt.

Je mehr Wasser ein Beton abgeben kann, also bei Mischungen mit hohem Wassergehalt infolge zu sandreicher Mischung und damit erhöhtem Zementleimbedarf oder bei zu hohem

Wasser-Zement-Wert  $w/z$ , sowie bei trockener Umgebung, umso größer ist das Schwindmaß.

Das Schwinden ist in jungem Betonalter stärker und wächst dann langsamer bis auf sein Endschwindmaß.

Gut nachbehandelter (warm und feuchtgehaltener) Beton schwindet langsamer und weniger. Ist die Schwindverformung behindert (wie bei an den Enden festgehaltenen Bauteilen), oder schwindet die Oberfläche eines Bauteils durch schnelle Austrocknung schneller als das Bauteil-Innere, so entstehen Schwindspannungen (Zugspannungen) und demzufolge Schwindrisse.

Der umgekehrte Fall des Quellens bei Wasseraufnahme in feuchter Umgebung hat baupraktisch wenig Bedeutung.

c) Infolge Temperaturerhöhung dehnt sich i.a. jeder feste Stoff aus, so auch der Beton. Eine Temperaturerniedrigung bewirkt eine Verkürzung.

Diese Temperaturverformungen sind zwar klein, aber bei großen Bauteilen oft von Bedeutung.

Als Anhaltswert sei folgendes Temperatur-Dehnungsmaß genannt:

Ein 10 m langes Betonbauteil verkürzt sich bei  $10^\circ$  Temperaturabfall um 1 mm, (Bei Temperaturanstieg ergibt sich eine entsprechend große Verlängerung).

Ist die Verkürzung behindert, so entstehen Zugspannungen und demzufolge Risse.

Ist eine Verlängerung behindert, so entstehen Druckspannungen und evtl. Folgeschäden durch diesen Druck.

### 1.3.3 Beton mit besonderen Eigenschaften

Die wichtigsten Betonarten mit besonderen Eigenschaften und ihre besonderen betontechnologischen Anforderungen sind im Heft "Beton - Herstellung nach Norm", Seiten 25, bis 27 angegeben. Dazu gehören Wasserundurchlässigkeit, hoher Frostwiderstand, hoher Frost- und Tausalz widerstand, hoher Verschleißwiderstand und hoher Widerstand gegen chemische Angriffe. In DIN 1045, 6.5.7, sind außerdem Anforderungen zu Beton für hohe Gebrauchstemperaturen bis  $250^\circ\text{C}$  und zu Beton für Unterwasserschüttung (Unterwasserbeton) festgelegt.

### 1.4 Nachweis der Güte und Güteüberwachung:

Die wichtigsten Anforderungen an Eignungsprüfungen, Güteprüfungen und Erhärtungsprüfungen sowie der Umfang der Güteprüfung für Ortbeton und bei Verwendung von Transportbeton sind im Heft "Beton - Herstellung nach Norm", Seiten 28 bis 32 zusammengestellt.

Die wichtigsten Prüfverfahren im Betonbau sind im Heft "Beton - Prüfung nach Norm" der Bauberatung Zement des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie (Beton – Verlag, Düsseldorf) beschrieben.

### 1.5 Nachbehandlung:

Die erforderlichen Maßnahmen zur richtigen Nachbehandlung von Beton gehen aus der "Richtlinie zur Nachbehandlung von Beton" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Fassung 1984, hervor. Nach dieser Richtlinie werden bei Beton langsame, mittlere und schnelle Festigkeitsentwicklungen unterschieden. Diese sind im Betonsortenverzeichnis und auf dem Lieferschein stets anzugeben.

## 2. Stahl

### 2.1 Stahlarten:

Im Stahlbetonbau DIN 1045 und Spannbetonbau (DIN 4227) werden Betonstähle nach DIN 488 und hochfeste Spannähle nach besonderer Zulassung verwendet.

Die Sorteneinteilung und die wichtigsten Eigenschaften der Betonstähle sind in Tabelle 1 der DIN 488 angegeben.

Die handelsüblichen Spannähle müssen den entsprechenden Zulassungsbescheiden entsprechen und weisen eine Streckgrenze bis  $1570\text{ N/mm}^2$  und eine Zugfestigkeit bis  $1770\text{ N/mm}^2$  auf.

### 2.2 Eigenschaften der Stähle:

Die Aufgabe der Stähle im Betonbau ist die Aufnahme von Zugkräften, da die Zugfestigkeit des Betons für statisch beanspruchte Bauteile nicht ausreicht.

Sorteneinteilung und Eigenschaften der Betonstähle (DIN 1045, Tabelle 6)

Wichtig ist bei den Stählen daher ihr Verformungsverhalten unter Zugspannung.

Das Verhältnis von Spannung zu Dehnung (Spannungs-Dehnungs-Linie) ist bei niedrigen und normalen Spannungen bei allen Stählen nahezu gleich. Dieses Verhältnis wird als Elastizitätsmodul bezeichnet und beträgt  $210.000 \text{ N/mm}^2$ .

Ab einer bestimmten Spannung nehmen die Dehnungen nicht mehr im gleichen Verhältnis, sondern stärker zu. Diese Spannung ist die Streckspannung oder "Streckgrenze".

Wird die Spannung über die Streckgrenze hinaus erhöht, so folgt nach weiteren starken Dehnungen der Bruch. Die dabei auftretende Spannung ist die "Zugfestigkeit", die zugehörige Dehnung ist die Bruchdehnung. Sie beträgt bei Betonstahl ungefähr 10%, d.h. unter der Bruchlast hat sich der Stahl um 10% verlängert. Konstruktionen, bei denen der Stahl die Streckgrenze überschreitet (starke Zunahme der Dehnungen), sind daher bautechnisch unbrauchbar.

Eine gemeinsame Eigenschaft aller Stähle ist die hohe Korrosionsempfindlichkeit.

Unter Korrosion versteht man die von der Oberfläche ausgehende Zerstörung eines Werkstoffs durch chemischen oder elektrochemischen Angriff. Daher erfordern alle Stähle im Bauwesen einen besonderen Rostschutz. Diesen kann bei Betonstahl und Spannstahl eine ausreichende Betonüberdeckung erfüllen.

2.3 Verbundverhalten von Stahl und Beton:

Die Tragwirkung des bewehrten Betons beruht auf der Aufgabenteilung zwischen Beton und Stahl. (Beton übernimmt Druck, Stahl übernimmt Zug oder Druck). Dies ist aber nur möglich, wenn eine enge Verbindung der beiden Baustoffe, der sogenannte "Verbund", gewährleistet ist. Der Stahl muß so im Beton verhaftet sein, daß eine Kraftübertragung zwischen den Materialien möglich ist.

Zur Erzielung eines ausreichenden Verbundverhaltens sind die Betonstähle nach DIN 488 gerippt, während die Spannstähle durch die Verdrillung der Litzen bei sofortigem Verbund eine ähnlich gute Verzahnung mit dem Beton ergeben, während der Verbund von Spanngliedern in Hüllrohren über den nachträglich eingebrachten Einpreßmörtel erreicht wird (nachträglicher Verbund).

Das Verbundverhalten tragender Stahleinlagen mit dem sie umgebenden Beton sollte auch bei Instandsetzungsarbeiten möglichst nicht gestört werden.

2.4 Betondeckung der Bewehrung:

Die Bewehrungsstäbe müssen zur Sicherung des Verbundes, des Korrosionsschutzes und zum Schutz gegen Brandeinwirkung ausreichend dick und dicht mit Beton ummantelt sein. Die Betondeckung jedes Bewehrungsstabes, auch der Bügel, darf nach allen Seiten die Mindestmaße nicht unterschreiten. Zur Sicherstellung dieser Mindestmaße sind dem Entwurf und der Ausführung die Nennmaße zugrunde zu legen. Das Nennmaß entspricht dem Verlegemaß der Bewehrung und ist auf der Bewehrungszeichnungen anzugeben. Es setzt sich aus dem Mindestmaß und einem Vorhaltemaß zusammen, das in der Regel 1,0 cm beträgt. Werden bei der Verlegung besondere Maßnahmen getroffen, so dürfen die Nennmaße um 0,5 cm verringert werden, ebenso bei Verwendung von Beton der Festigkeitsklasse B 35 und höher. Jedoch dürfen die Mindestmaße nicht kleiner sein als der Durchmesser der eingelegten Bewehrung oder als 1,0 cm.

Die Betondeckung ist zu vergrößern, wenn die Oberfläche des Bauteils bearbeitet oder durch mechanische Einwirkungen beansprucht oder durch Verschleiß stark abgenutzt wird.

Besondere Betondeckungsmaßen sind bei Bauteilen mit höherer Feuerwiderstandsdauer zu beachten, entsprechend DIN 4102.

3. Carbonatisierung des Betons:

3.1 Chemische Vorgänge:

Es gibt auf der Erde nur etwa 100 "reine" Stoffe, die nur aus Atomen der gleichen Sorte bestehen. Der Chemiker nennt solche Stoffe "Elemente". So besteht eine beliebige Menge reinen Eisens nur aus Eisen-Atomen gleicher Bauart, die sich weder auf mechanischem Wege noch chemisch in andere Bestandteile zerlegen lassen. Ebenso verhält es sich mit reinem Sauerstoff, ein Gas, das nur aus Sauerstoff-Atomen besteht. Auch Sauerstoff ist also ein Element.



Aus den Elementen sind alle übrigen, uns bekannten Stoffe aufgebaut, entweder als feste Verbindungen von "Elementen", oder als Verbindungen dieser Verbindungen oder Mischung von Verbindungen.

Einige der auf der Erde vorkommenden, auch im Bauwesen wichtigen Elemente sind nachfolgend aufgeführt:

- Wasserstoff H
- Sauerstoff O
- Kohlenstoff C
- Calcium Ca
- Silicium Si
- Chlor Cl
- Schwefel S
- Silber Ag
- Chrom Cr
- Natrium Na
- Stickstoff N
- Magnesium Mg
- Aluminium Al
- Eisen Fe
- Kalium K

Wenn zwei oder mehrere Elemente sich immer im gleichen Verhältnis verbinden, sprechen wir von einer "chemischen Verbindung". Verbinden sich z.B. immer 2 Wasserstoffatome (H) mit 1 Sauerstoffatom (O), so entsteht die chemische Verbindung, die wir Wasser nennen. Die chemische Abkürzung (Formel) dafür ist dann:

- H<sub>2</sub>O

Zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom ist also die kleinste Einheit des Stoffes Wasser. Solche kleinsten Einheiten von chemisch festen Verbindungen nennen wir "Moleküle".

Andere Beispiele für chemische Verbindungen sind z.B.:

- CO<sub>2</sub> - Kohlendioxyd
- HCl - Chlorwasserstoff (Salzsäure)
- Na Cl - Natriumchlorid (Kochsalz)

Chemische Verbindungen können sich mit anderen chemischen Verbindungen koppeln und daraus können neue Verbindungen entstehen: z.B.

$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$  (Kohlensäure)

Außerdem gibt es viele Stoffe, die aus mehreren Verbindungen, in denen Atome und Moleküle der unterschiedlichsten Stoffe, gemischt sind. (Holz, Erde oder Beton)

3.2 Der Korrosionsvorgang:

Die meisten Metalle haben das Bestreben, chemische Verbindungen mit anderen Elementen einzugehen.

Unter Korrosion eines Metalls versteht man die von der Oberfläche ausgehende Zerstörung eines Metalls durch Herauslösen von Metallatomen infolge chemischer oder elektrochemischer Reaktion mit den umgebenden Stoffen.

Bei der Korrosion von Eisen oder Stahl läuft neben komplizierten Vorgängen im Prinzip die folgende chemische Reaktion ab:

- $2 \text{Fe} + 1,5 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{FeO}(\text{OH})$

- Eisen ==> Eisenoxydhydrat
- (1 Raumteil) ==> (ca. 2,5 Raumteile)

Durch die Volumenvergrößerung des Endproduktes nimmt der angerostete Stahl mehr Raum ein. Im Falle der Einbettung in Beton kann daher die Rostbildung eine Abspaltung der Betondeckung bewirken.

Aus der chemischen Formel ist schon ersichtlich, welche Stoffe außer dem Eisen selbst beim Korrosionsvorgang vorhanden sein müssen:

- Sauerstoff (O)
  - Wasser (H<sub>2</sub>O)
  - Es darf keine Zwischenschicht auf der Stahloberfläche den Zutritt von Sauerstoff und Feuchtigkeit behindern, d.h. die Stoffe müssen sich miteinander unbehindert verbinden können.
- Ist eine dieser 3 Voraussetzungen nicht erfüllt, kann der Stahl nicht rosten, es sei denn, er wird durch andere, stahlangreifende Stoffe (z.B. Salzsäure) angegriffen.

### 3.3 Bedeutung des pH – Wertes:

Die meisten chemischen Reaktionen spielen sich in wässrigen Lösungen ab. Dabei können auch Wassermoleküle aufgespalten werden oder aus anderen Verbindungen positiv aufgeladene Wasserstoff-Atome (H<sup>+</sup>) und negativ aufgeladene (OH<sup>-</sup>) - Gruppen entstehen. Die beiden "Ionen" können sich wieder zu elektrisch neutralem Wasser verbinden (z.B. H<sup>+</sup> + OH<sup>-</sup> = H<sub>2</sub>O) oder können allein Verbindungen mit anderen Stoffen eingehen.

- Lösungen, in denen viele H<sup>+</sup> - Ionen vorkommen, reagieren "sauer", sie wirken als Säure.
- Lösungen, in denen viele OH<sup>-</sup> - Ionen vorkommen, reagieren "alkalisch", sie wirken als Alkalie oder als Base (auch Lauge genannt).

Hat eine Lösung einen hohen Anteil an OH<sup>-</sup> - Ionen, d.h. an negativ aufgeladenen OH-Gruppen, dann spricht man von, einem hohen pH-Wert. Diese Stoffe sind also stark "alkalisch", d.h. sie wirken als starke Lauge.

Andererseits haben Lösungen mit einer hohen Konzentration von H<sup>+</sup> - Ionen einen niedrigeren pH-Wert, weil dann weniger (oder gar keine) OH<sup>-</sup> - Ionen enthalten sind.

Die Besonderheit der Lösungen mit hohem PH-Wert, also der starken Laugen oder Alkalien ist, daß sie korrosionsschützende Eigenschaften haben.

Die Skala der pH-Werte reicht von 0 bis 14. Der pH - Wert ist also eine Meßzahl dafür, wie "Sauer" oder wie "alkalisch" eine Lösung reagiert.

Der Beton ist von seiner Zusammensetzung her eine starke Lauge mit dem pH-Wert ca. 12,5.

Die OH-Gruppen, die die alkalischen Eigenschaften verursachen, entstehen bei der Hydratation des Zements zu Zementstein. Dabei entsteht im Porenwasser des Zementsteins gelöstes Calciumhydroxyd Ca (OH)<sub>2</sub>, wodurch der hohe pH-Wert erklärt ist. Es bildet sich auf den Stahloberflächen im Beton eine alkalische Schutzschicht, die den Zutritt von Sauerstoff und Wasser an den Stahl verhindert. Der Stahl kann nicht mit diesen Stoffen reagieren, er bleibt passiv, weshalb man auch von einer "Passivierung" infolge der "Passivschicht" spricht.

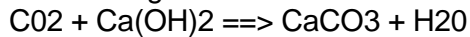
Merke: Das Porenwasser des Betons enthält Ca(OH)<sub>2</sub>, das wirkt alkalisch (hoher pH-Wert) und schützt den Stahl vor Rost, indem es um den Stahl eine Passivschicht (Schutzschicht) bildet, die die Korrosion verhindert.

### 3.4 Änderung der Betoneigenschaften und Auswirkung auf den Korrosionsschutz der Bewehrung - Carbonatisierung

Mit zunehmendem Betonalter wird die Alkalität des Betons von seiner Oberfläche her aufgehoben, und daher kann auch nahe der Betonoberfläche liegender Stahl wieder korrosionsgefährdet sein.

Dies hat folgende Ursache:

Durch die gegebene Betonporosität dringt die Kohlensäure (Kohlendioxid, CO<sub>2</sub>) der Luft (natürlicher CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre etwa 0,03 Vol.-%, durch Industrie max.0,06 Vol.-%) in den Beton ein. Die Kohlensäure CO<sub>2</sub> verbindet sich dabei mit dem Calciumhydroxyd Ca(OH)<sub>2</sub> der Betonporenflüssigkeit zu neutralem Kalkstein CaCO<sub>3</sub> unter gleichzeitiger Freisetzung von Wasser.



Durch die Bildung des neutralen Kalksteins unter Verbrauch von Ca(OH)<sub>2</sub> aus der Porenflüssigkeit sinkt deren pH-Wert auf Werte unter 10, so daß dann in diesen Bereichen kein Korrosionsschutz mehr für den Bewehrungsstahl besteht. Diesen Prozeß (Bildung von Kalkstein unter Einwirkung des natürlichen CO<sub>2</sub>-Gehalts der Luft mit dem gleichzeitigen Absinken des pH - Wertes unter 10) nennt man die "Carbonatisierung" des Betons.

Bei normgerecht hergestelltem Beton mit hoher Dichtigkeit schreitet die Carbonatisierung von außen nach innen sehr langsam fort.

Merke: Der chemische Vorgang der Carbonatisierung dringt im Laufe der Zeit von der Oberfläche ausgehend ins Innere des Betonteils vor. Wenn der Stahl im carbonatisierten Betonbereich liegt, wird die Passivschicht um den Stahl aufgelöst, so daß bei Zutritt von Sauerstoff und Feuchtigkeit Rostbildung einsetzen kann.

3.5 Wirkung der Chloride:

Bei einbetoniertem Stahl treten auch Korrosionserscheinungen auf, wenn Chloride im Beton vorhanden sind. Negativ aufgeladene Chlor-Atome (Chlor-Ionen) sind in der Lage, die Passivität des Stahls auf kleinen Bereichen aufzuheben. Durch die Aufhebung der Passivierung erfolgt eine örtliche Aktivierung der Oberfläche. An dieser Stelle kann eine anodische Eisenauflösung in Richtung zum Stabinneren vor sich gehen und führt zu trichterförmigen Anfressungen des Stahlstabes.

Hauptursachen für das Eindringen von Chloriden in den Beton sind:

- a) Verwendung von Streusalz bei Frost
- b) Zersetzung von PVC (Polyvinylchlorid) bei Brandeinwirkung, dadurch Abspaltung von Chlorwasserstoff (HCl), der in den Beton eindringt.
- c) Verwendung von Chloridhaltigen Baustoffbestandteilen.

Quellen:

Bonzel J.: "Beton" ; Betonkalender 1989, Teil 1 ; Verlag: Ernst & Sohn

Neiseke, J.: "Ursachen typischer Betonoberflächenschäden infolge Bewehrungskorrosion" ; Arbeitsunterlagen des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Uni Braunschweig

Jungwirth, D., Beyer, E. und Grübl, P.: "Dauerhafte Betonbauwerke" ; Betonverlag, 1986  
Übernommen aus den Unterlagen des Lehrgangs "Schutz und Instandsetzen von Betobauteilen" ; Referent: Dr. - Ing. O. Hjorth (1994, SIVV Lehrgang, Bwf der hessischen BG)