

Über den Wassergehalt von Beton bei höheren Temperaturen

Von Wilhelm Manns, Düsseldorf

Übersicht

In manchen Anwendungsbereichen ist Beton der dauernden Einwirkung von höheren, über 100 °C hinausgehenden Temperaturen ausgesetzt. In diesem Fall ist die Kenntnis des Wassergehalts beispielsweise dann notwendig, wenn die Abschirmwirkung von Beton gegenüber Neutronenstrahlen bei höheren Temperaturen zu beurteilen ist. Der Gehalt an gebundenem Wasser von trockenem Beton ist Ausgangswert für den Wassergehalt bei höheren Temperaturen, er setzt sich zusammen aus dem im Zementstein und im Zuschlag enthaltenen Wasser.

Nach 28 Tagen Normlagerung beträgt der Gehalt an gebundenem Wasser im trockenen Zementstein je nach Wasserzementwert, Mahlfeinheit und chemisch-mineralogischer Zusammensetzung 14 bis 19 Gew.-%, bezogen auf den Zement. In höherem Alter kann bei weitgehender Hydratation mit etwas höheren Werten (20 bis 22 Gew.-%) gerechnet werden. Der Wassergehalt von Zementstein bei höheren Temperaturen kann einheitlich abgeschätzt werden, so ist beispielsweise bei einer langandauernden Einwirkung von 300 °C noch mit rd. 55 % des ursprünglichen Gehalts an gebundenem Wasser zu rechnen.

Der Gehalt an gebundenem Wasser ist bei normalem Zuschlag (Kiessand: 0,5 bis 2,0 Gew.-%) gering. Einen höheren Wassergehalt (10 bis 13 Gew.-%) weist lediglich kristallwasserhaltiger Zuschlag auf, dessen spezielles Entwässerungsverhalten bei höheren Temperaturen berücksichtigt werden muß.

Reicht eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung des Wassergehalts von Beton bei höheren Temperaturen nicht aus, so kann der Wassergehalt versuchsmäßig (thermogravimetrisch, chemisch) bestimmt werden.

1. Allgemeines

Beton wird auch zu Bauteilen verwendet, die höheren als klimatisch bedingten Temperaturen ausgesetzt werden. Durch höhere Temperaturen können einzelne Betoneigenschaften, wie z. B. die Druckfestigkeit, das Kriechen, die Wärmedehnzahl oder auch der Wassergehalt, gegenüber jenen des normalen Temperaturbereiches verändert werden. In bezug auf den Wassergehalt ist dementspre-

chend eine Temperatur von rd. 100 °C bereits eine höhere Temperatur, weil beim dauernden Einwirken dieser Temperatur Beton kein verdampfbares (freies) Wasser mehr enthält und weil beim Überschreiten dieser Temperatur ein Teil des bei normalen Klimabedingungen gebundenen Wassers freigesetzt wird. Bei noch höheren Temperaturen im Bereich von 800 bis 1000 °C gibt Beton praktisch alles in ihm enthaltene Wasser ab; in diesem Temperaturbereich geht daher die hydraulische Bindung nahezu vollständig verloren.

Für manche Anwendung ist die Kenntnis des Wassergehalts bei höheren Temperaturen bzw. die Kenntnis der bei solchen Temperaturen freiwerdenden Wassermenge notwendig. Das ist der Fall, wenn die Abschirmwirkung von Beton gegenüber Neutronenstrahlen bei höheren Temperaturen zu beurteilen ist oder wenn der bei Einwirkung höherer Temperaturen entstehende Wasserdampfdruck im Beton abzuschätzen ist, der z. B. durch Stahl liner gasdicht abgeschlossen wird.

Beton kann in kerntechnischen Anlagen Temperaturen von mehreren hundert Grad Celsius annehmen. Nachfolgend werden die chemisch-physikalischen Vorgänge beschrieben, die allgemein für den Wassergehalt von Beton bei höheren Temperaturen bestimmend sind.

2. Wassergehalt von trockenem Beton

Aus verarbeitungstechnischen Gründen muß der Wassergehalt des Frischbetons in der Regel größer gewählt werden als der Betrag, den der Zement chemisch und physikalisch zu binden vermag. Aus diesem Grund enthält der Zementstein im erhärteten Beton unter normalen Klimabedingungen nichtgebundenes Wasser sowie physikalisch und chemisch gebundenes Wasser. Da die einzelnen Bindungszustände nicht genau gegeneinander abzugrenzen sind, können die einzelnen Anteile nur annähernd angegeben werden. Daher hat es sich auch eingebürgert, vereinfacht von verdampfbarem oder freiem Wasser und von nichtverdampfbarem oder gebundenem Wasser zu sprechen. Der Gehalt an verdampfbarem Wasser läßt sich durch Trocknen im Trockenschrank bei 105 ± 5 °C, durch Trocknen im Exsikkator oder durch Vakuumtrocknung bei 20 °C bestimmen [1, 2, 3 u. a.]. Beton bzw. Zuschlag und Zementstein, der solch einer Behandlung unterworfen wurde, wird als „trocken“ oder „getrocknet“ bezeichnet. Das in diesem Zustand noch vorhandene Wasser im Zuschlag und Zementstein des Betons ist nichtverdampfbares oder gebundenes, im wesentlichen chemisch gebundenes Wasser.

Neben dem im Zementstein gebundenen Wasser ist nur dann noch zusätzlich Wasser enthalten, wenn kristallwasserhaltiger Zuschlag, wie z. B. Serpentin oder Limonit, verwendet wird oder wenn der normale Zuschlag geringe Anteile kristallwasserhaltiger Mineralien enthält. Allgemein gilt:

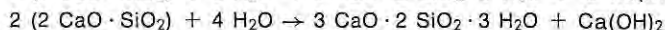
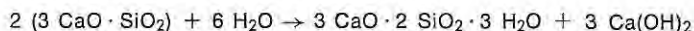
$$W_{\text{Beton}} = W_{\text{Zuschlag}} + W_{\text{Zementstein}}$$

(W jeweils in l/m³ trockenen Beton)

2.1. Wassergehalt von trockenem Zementstein

Bei der Hydratation bildet der Zement wasserhaltige Verbindungen, die sog. Hydratphasen; hierbei binden die einzelnen Zementbestandteile unterschiedliche Anteile an Wasser. Obwohl bei der Hydratation von Zement eine Vielzahl zum Teil voneinander abhängiger Reaktionen abläuft, die in ihren Einzelheiten noch nicht restlos geklärt sind, kann für die wichtigsten Verbindungen des Portlandzementklinkers die Reaktion in vereinfachter Weise dargestellt werden [4, 5, 6 u. a.].

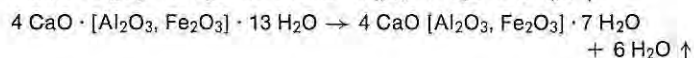
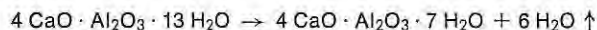
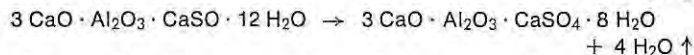
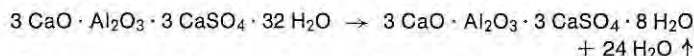
Für die Calciumsilicate $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ und $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ werden meist folgende Reaktionen angegeben:



Stöchiometrisch errechnet sich danach für das Tricalciumsilicat ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$) eine Wasserbindung von 24 Gew.-% und für das Dicalciumsilicat ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$) eine Wasserbindung von 21 Gew.-%. Die Angaben spiegeln die Verhältnisse bei größerem Wasserangebot gut wieder. Bei Verhältnissen, wie sie im Frischbeton allgemein vorliegen, sind die entstehenden Calciumsilicathydrate in der Regel etwas reicher an Calciumoxid, was zu geringeren Gehalten an Calciumhydroxid führt.

Während das Calciumhydroxid bei einer Trocknung im Vakuum oder Exsikkator bei 20°C oder unter normalen Bedingungen bei 105°C Wasser nicht abgibt, muß bei den Calciumsilicathydraten schon mit einer Wasserabgabe bis zu einem Mol gerechnet werden [7]. Daher kann in trockenem Zementstein für das Tricalciumsilicat nur eine Wasserbindung von rd. 20 Gew.-% und für das Dicalciumsilicat eine Wasserbindung von 16 Gew.-% angenommen werden.

Wesentlich mehr Wasser als die Hydratphasen der Calciumsilicate geben bei Trocknung die Hydratphasen von Tricalciumaluminat ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), Calciumsulfat (CaSO_4) und Calciumaluminatferrit ($2 \text{ CaO} [\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3]$) ab. Man kann näherungsweise annehmen, daß die bei normalen Umweltbedingungen entstehenden und auch beständigen Hydratationsprodukte, nämlich die Calciumaluminatsulfathydrate ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$ [Ettringit, Trisulfat] und $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$ [Monosulfat]) sowie das Tetra-calciumaluminathydrat ($4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13 \text{ H}_2\text{O}$) und die Hydrate des Calciumaluminatferrits ($4 \text{ CaO} [\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3] \cdot 13 \text{ H}_2\text{O}$) wasserärmere Verbindungen nach folgendem Schema bilden:



Unter Normalbedingungen vermag Calciumaluminatferrit etwa 70 Gew.-% Wasser zu binden, während für Tricalciumaluminat und

Calciumsulfat je nach der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung des Zements und den Erhärtingsbedingungen eine Wasserbindung zwischen 55 und 80 Gew.-% anzunehmen ist. In trockenem Zementstein können für Calciumaluminatferrit nur noch rd. 35 Gew.-% gebundenes Wasser und für Tricalciumaluminat und Calciumsulfat noch zwischen 20 und 40 Gew.-% gebundenes Wasser angesetzt werden.

Trotz unterschiedlicher Wasserbindung und unterschiedlichem Gehalt der einzelnen Zementbestandteile errechnet sich aus diesen Werten für handelsübliche Zemente mit 24 ± 1 Gew.-% ein nur in geringen Grenzen schwankender Gesamtwert an gebundenem Wasser für den trockenen Zementstein. (Der für Normalbedingungen, d. h. für 20°C und 65 % relative Feuchte, häufig angegebene Gehalt an gebundenem Wasser von 37 ± 2 Gew.-% gilt nicht für trockenen Zementstein, da die Hydratphasen in der geschilderten Art teilweise entwässern.) Der Einfluß der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Zemente auf den Gesamtwert an gebundenem Wasser ist für praktische Belange in der Regel vernachlässigbar.

Die theoretischen angegebenen Werte für die Wasserbindung des Zements stimmen gut mit Versuchswerten an vollständig erhärtetem Zementstein überein, der mehrere Jahre im Wasser gelagert hat.

Unter praktischen Bedingungen kommt im Beton der Hydratationsprozeß durch Austrocknen meist zum Stillstand, ehe der Zement vollständig hydratisiert ist, so daß ein Wert von rd. 0,24 als oberer Wert für den Wassergehalt im trockenen Zementstein zu betrachten ist. Der im Zementstein tatsächlich vorhandene Wassergehalt hängt in erster Linie vom Hydratationsgrad bzw. von der Dauer der Feuchtlagerung und dem Wasserzementwert ab. Bis zum Alter von 28 Tagen haben auch noch die chemisch-mineralogische Zu-

Tafel 1 Anhaltswerte für das gebundene Wasser in trockenem (getrocknetem) Zementstein

Hydratationsgrad bzw. Lagerungsdauer	geb. Wasser bezogen auf den Zement (geb w) bei einem Wasserzementwert	
	$\leq 0,50$	$> 0,50$
Vollständige Hydratation weitgehende Hydratation ¹⁾	0,21 bis 0,23 0,19 bis 0,21	0,23 bis 0,25 0,21 bis 0,23
28 Tage Normlagerung ²⁾		
L-Zement (HOZ)	0,14 bis 0,16	0,15 bis 0,17
F-Zement (PZ)	0,16 bis 0,18	0,17 bis 0,19

1) Für Bauteile, die vor dem Austrocknen geschützt sind, oder für massive Bauteile können in höherem Alter (3 Monate) die Werte für weitgehende Hydratation Verwendung finden.

2) Für Zemente mit hohem Anteil an Tricalciumsilicat und für Zemente mit hoher Mahlfineinheit sind Werte aus dem oberen Bereich zu wählen.

sammensetzung der Zemente und die Mahlfineinheit einen nennenswerten Einfluß. In Tafel 1 sind Anhaltswerte für das gebundene Wasser in trockenem Zementstein zusammengestellt, denen Versuchswerte verschiedener Veröffentlichungen zugrunde liegen [1, 8, 9, 10, 11 u. a.].

Mit den Anhaltswerten der Tafel 1 läßt sich der Wassergehalt von trockenem Zementstein angeben:

$$W_{\text{Zementstein}} = \text{geb } w \cdot Z$$

Hierin bedeuten:

$W_{\text{Zementstein}}$ = Wassergehalt des trockenen Zementsteins in l/m^3 Beton,

geb w = gebundenes Wasser im trockenen Zementstein, bezogen auf das Zementgewicht,

Z = Zementgehalt in kg/m^3 Beton.

2.2. Wassergehalt von trockenem Zuschlag

Zuschlag enthält nach Trocknung, bei der Oberflächenfeuchte und Kernfeuchte [12] verdampfen, nur noch gebundenes Wasser. Der Gehalt an gebundenem Wasser von normalem Zuschlag ist gering; bei Kiessand kann er je nach Vorkommen zwischen 0,5 und 2,0 Gew.-% liegen. (Bei Rheinkießsanden aus dem Köln-Düsseldorfer Raum wurden Wassergehalte zwischen 0,5 und 1,0 Gew.-% gefunden.)

Bei der rechnerischen Ermittlung des Wassergehalts von trockenem Kiessandbeton wird dieser Wassergehalt oft nicht berücksichtigt, was zwar auf der einen Seite bei der Berechnung der Neutronenabschwächung zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führt, was aber auf der anderen Seite bei der versuchsmäßigen Bestimmung des Wassergehalts durch Erhitzen zu fehlerhaften Angaben führen kann.

Wesentlich höher als bei normalem Zuschlag liegt der Wassergehalt bei sogenanntem kristallwasserhaltigen Zuschlag, wie z. B. bei Limonit oder Serpentin. Je nach Mineralbestand enthält Limonit 10 bis 12 Gew.-% und Serpentin 11 bis 13 Gew.-% Kristallwasser [13].

Diese Zuschläge werden für Strahlenschutzbeton verwendet, wenn der für die Neutronenabschwächung notwendige Gehalt an Wasser über den im Zementstein gebundenen Anteil nennenswert gesteigert werden muß. Allgemein läßt sich der anteilige Wassergehalt des Zuschlags im trockenen Beton angeben:

$$W_{\text{Zuschlag}} = \text{geb } w' \cdot G$$

Hierin bedeuten:

W_{Zuschlag} = Wassergehalt des trockenen Zuschlags in l/m^3 Beton,

geb w' = gebundenes Wasser im trockenen Zuschlag, bezogen auf das Zuschlaggewicht,

G = Zuschlaggewicht in kg/m^3 Beton.

3. Wassergehalt bei höheren Temperaturen

Wird trockener Beton höheren Temperaturen als 100 °C ausgesetzt, so wird ein Teil des gebundenen Wassers frei und kann verdampfen. Die Anteile an nichtverdampfbarem bzw. verdampfbarem Wasser für einzelne Temperaturstufen lassen sich in thermogravimetrischen Untersuchungen bestimmen.

3.1. Thermogravimetrische Untersuchungen

Bei thermogravimetrischen Untersuchungen wird der Gewichtsverlust in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Dieser Gewichtsverlust entspricht, wenn er an carbonatfreiem Beton (Zementstein, Zuschlag) in inerter Atmosphäre ermittelt wird, dem temperaturbedingten Wasserverlust. Bei vorher getrockneten carbonatfreien Proben stellt der Gewichtsverlust ausschließlich den Verlust an gebundenem Wasser dar, er wird daher auch als Entwässerung bezeichnet. Bei normalem CO₂-Partialdruck beginnt eine nennenswerte Entsäuerung des Calciumcarbonats erst bei Temperaturen über 700 °C [14], so daß bis zu dieser Temperatur aus der Gewichts-Temperatur-Kurve auch der Wasserverlust von nicht carbonatfreiem Beton (Zementstein, Zuschlag) mit ausreichender Genauigkeit abgeleitet werden kann.

Der Gehalt an Wasser, den eine Probe bei einer bestimmten höheren Temperatur noch enthält, ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Wassergehalt bei Versuchsbeginn und dem Gewichtsverlust bei der betrachteten Temperatur. Eine Überprüfung einer derartigen Betrachtung ist an einer gleichartig behandelten Probe durch eine chemische Analyse möglich [15].

Thermogravimetrische Untersuchungen werden bei stufenweise konstantgehaltener oder stetig steigender Temperatur durchgeführt [16]. Im ersten Fall wird die Temperatur auf einzelnen Stufen bis zur (näherungsweise) Gewichtskonstanz der Probe nicht verändert, als Versuchsergebnis werden in Abhängigkeit von den einzelnen Temperaturstufen die sich bei Gewichtskonstanz einstellenden Probengewichte aufgetragen. Im zweiten Fall wird die Temperatur mit einer konstanten Geschwindigkeit gesteigert, als Versuchsergebnis wird das Probengewicht in Abhängigkeit von der zum Zeitpunkt der Wägung vorhandenen Temperatur aufgetragen. Das Versuchsergebnis ist in diesem Fall von der Geschwindigkeit der Temperaturzunahme abhängig, die bei Zementsteinuntersuchungen meist zwischen 5 und 10 K/min liegt. Während ein mit stetig steigender Temperatur durchgeführter Versuch (Kurzzeitversuch) nur wenige Stunden dauert, kann ein Versuch bei stufenweise konstantgehaltener Temperatur (Langzeitversuch) einige Wochen in Anspruch nehmen. Ein Langzeitversuch läßt im Hinblick auf dauernd einwirkende Temperaturen zutreffende Folgerungen zu, ein Kurzzeitversuch gibt dagegen die Verhältnisse bei kürzer einwirkender Temperatur (Störfall, Brandfall) ausreichend genau wieder. Die Temperatur-Gewichtsverlust-Kurve eines Kurzzeitversuchs ist gegenüber dem Langzeitversuch nach höheren Temperaturen hin verschoben. Die Größe dieser Verschiebung hängt u. a. ab von der Aufheizgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit, mit der die flüchtigen Bestandteile aus der Probe

diffundieren können. Für eine Aufheizgeschwindigkeit von rd. 10 K/min einer üblichen Thermowaage liegt die Verschiebung der Temperatur-Gewichtsverlust-Kurve für eine im Grammbereich liegende pulverfein aufbereitete Probe (Korndurchmesser $\leq 0,063$ mm) meist zwischen 100 und 200 K.

3.2. Wassergehalt von Zementstein bei höheren Temperaturen

Die Entwässerung der einzelnen Hydratphasen im Zementstein verläuft unterschiedlich. Während Calciumhydroxid im Stufenversuch bei niedrigem Wasserdampfpartialdruck bei einer Temperatur von knapp 400 °C das gesamte gebundene Wasser abgibt, entwässern die übrigen Hydratphasen stufenweise oder kontinuierlich [17, 18]. Bild 1 zeigt das Verhalten von Calciumhydroxid, Ettringit und Tetracalciumaluminat-hydrat. Da die Hydratphasen der Calciumsilicate inhomogen sind, läßt sich für sie eine einheitliche Entwässerungskurve schwerlich angeben. Verschiedene Versuche haben jedoch gezeigt, daß die im Normalfall im Zementstein gebildeten Calciumsilicathydrate näherungsweise kontinuierlich ihr gebundenes Wasser abgeben [19].

Trotz des unterschiedlichen Verhaltens der einzelnen Hydratphasen entwässert Zementstein im betrachteten Temperaturbereich zwischen 100 und 800 °C nach Bild 2 [19] in etwa kontinuierlich und weist lediglich im Bereich der Entwässerung von Calciumhydroxid einen sprunghaften Abfall des Wassergehalts auf. Dieses Verhalten zeigt Zementstein unabhängig von der Hydrationsdauer. Die Entwässerungskurven für die verschiedenen Altersstufen (Hydrationsstufen) haben außerdem einen so ähnlichen Verlauf, daß sie für den praktischen Gebrauch zu einer Kurve zusammengezogen werden können, bei der der Gehalt an gebunde-

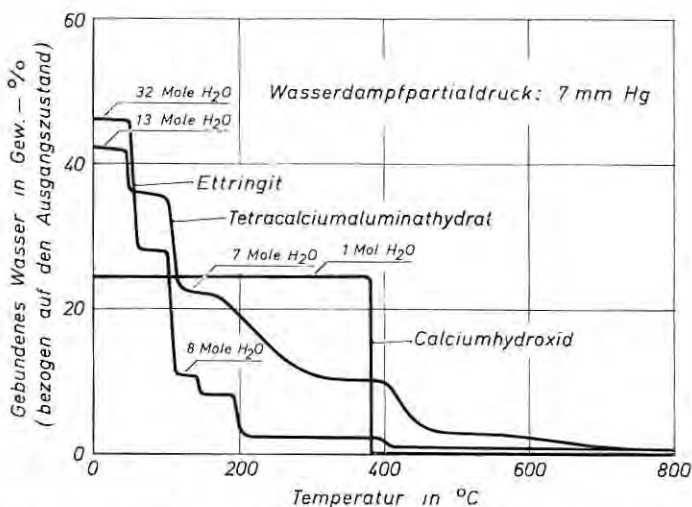


Bild 1 Entwässerung von Calciumhydroxid, Ettringit, Tetracalciumaluminat-hydrat [16, 17]

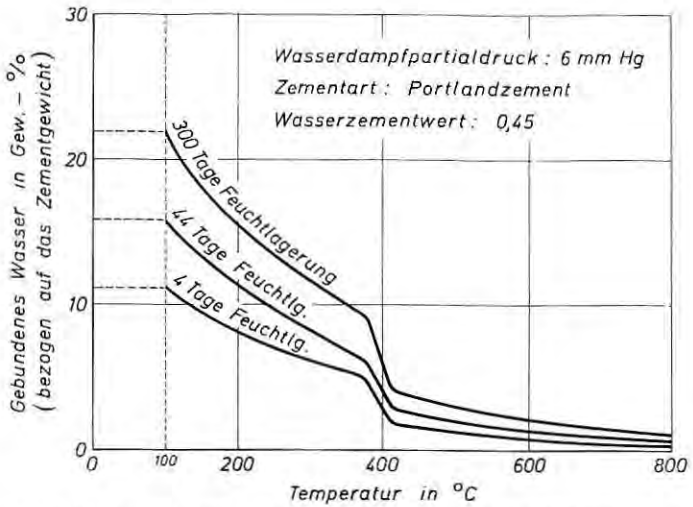


Bild 2 Entwässerung von Zementstein in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad (Dauer der Feuchtlagerung) [19]

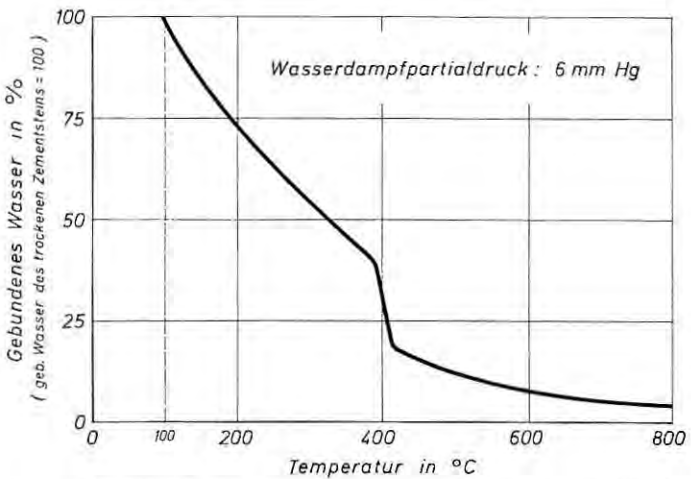


Bild 3 Entwässerung von Zementstein bei niedrigem Wasserdampfpartialdruck und stufenweise konstantgehaltener Temperatur (verallgemeinerte Darstellung von Bild 2)

nem Wasser bei 100 °C zu 100 % angenommen wird (Bild 3). Bei hüttensandhaltigen Zementen ist der Steilabfall im Bereich der Entwässerung von Calciumhydroxid weniger ausgeprägt. Dieser Steilabfall wird mit zunehmendem Gehalt an Hüttensand immer kleiner, weil bei der Hydratation des Hüttensandes ein Teil des Calciumhydroxids verbraucht wird, das bei der Hydratation des Klinkeranteils frei wird [20]. Trotz dieses unterschiedlichen Ver-

haltens von Portland- und Hüttenzementen kann für praktische Belange meist der Einfluß der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung auf die Entwässerungskurve von Zementstein vernachlässigt werden.

Diese Kurve gilt für niedrigen Wasserdampfpartialdruck, sie verlagert sich mit steigendem Wasserdampfpartialdruck zu höheren Temperaturen. Bekannt ist beispielsweise, daß Calciumhydroxid, das bei niedrigem Wasserdampfpartialdruck bei knapp 400 °C entwässert, bei einem Wasserdampfpartialdruck von 1 bar erst bei rd. 510 °C zerfällt [17]. Für die anderen Bestandteile des Zementsteins sind bisher keine entsprechenden Werte bekannt, damit liegen auch über das Entwässerungsverhalten von Zementstein bei höheren Wasserdampfpartialdrücken noch keine allgemein brauchbaren Angaben vor. Häufig erscheint es für praktische Fragen jedoch vertretbar, von dem Verhalten bei niedrigem Dampfdruck auszugehen. So stellt für Strahlenschutzbetrachtungen ein so ermittelter Wassergehalt eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung dar.

3.3. Wassergehalt von Zuschlag bei höheren Temperaturen

Getrockneter Zuschlag gibt gebundenes Wasser in der Regel bei höheren Temperaturen als Zementstein ab, da die meisten wasserhaltigen Verbindungen, die in normalem Zuschlag vertreten sein können, wie z. B. Tonminerale, Glimmer und Hornblende, den Großteil ihres Wassers erst bei Temperaturen oberhalb von 500 °C abgeben. Während Zementstein bei einer Temperatur von 300 °C nach Bild 3 nur noch rd. 55 % des bei 105 °C gebundenen Wassers enthält, ergaben Versuche an Rheinkiessand, daß bei 300 °C noch etwa 80 % des nach Trocknung bei 105 °C festgestellten Wassers vorhanden waren. Wenn bei der Abschätzung des Wassergehalts im Hinblick auf den Strahlenschutz bei Beton aus normalem Zuschlag allein das Entwässerungsverhalten des Zementsteins nach Bild 3 zugrunde gelegt wird, ist der entstehende Fehler gering und liegt zudem noch auf der sicheren Seite. Dieses Vorgehen scheint auch dadurch gerechtfertigt, daß normaler Zuschlag in der Regel einen geringen Anteil zum Gehalt an gebundenem Wasser im Beton beiträgt.

Stammt jedoch ein größerer Anteil des Wassers des Betons aus dem Zuschlag — wie es bei Verwendung von Limonit und Serpentin der Fall ist —, so muß das gebundene Wasser des Zuschlags getrennt betrachtet werden. Serpentin gibt im Vergleich zum Limonit sein gebundenes Wasser nach Bild 4 erst bei höheren Temperaturen ab, so daß Strahlenschutzbeton mit erhöhtem Wassergehalt bei Verwendung von Serpentin höheren Betriebstemperaturen ausgesetzt werden kann als Strahlenschutzbeton aus Limonit [13].

3.4. Wassergehalt von Beton bei höheren Temperaturen

In den Fällen, in denen eine Abschätzung des Wassergehalts von Beton bei höheren Temperaturen aus dem Verhalten des Zementsteins bzw. des Zuschlags nicht ausreichend erscheint, können Versuche an Beton genaueren Aufschluß geben.

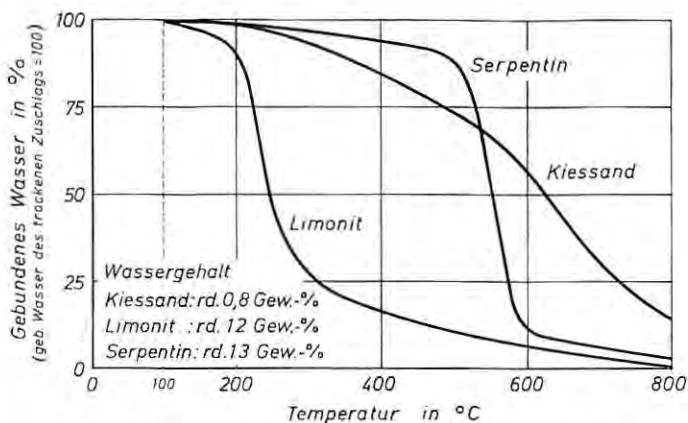


Bild 4 Entwässerung verschiedener Zuschläge bei niedrigem Wasserdampfpartialdruck und stetig steigender Temperatur

Für solche Untersuchungen müssen die Betonproben einer ausreichend langen feuchten Nachbehandlung (Wasserlagerung) unterworfen werden, damit sich ein dem zu beurteilenden Bauteil zuzuordnender Gehalt an gebundenem Wasser einstellen kann. Probekörper, die zur Aussage über das Verhalten von massigen oder dicht umschlossenen Betonbauteilen herangezogen werden sollen, bedürfen daher mindestens einer etwa einmonatigen Wasserlagerung. Bei einer kürzeren Nachbehandlungsdauer kann — insbesondere bei Zementen mit langsamerer Anfangserhärtung — nicht mit demjenigen Gehalt an gebundenem Wasser gerechnet werden, der sich im Inneren von massigen Bauteilen aufgrund des lange Zeit vorhandenen, für den Fortgang der Hydratation ausreichenden Wasserangebots ergibt.

Zur Bestimmung des Wassergehalts bei höheren Temperaturen kann entweder eine im Grammbereich liegende Probe pulverfein aufbereiteten Betons in einer üblichen Thermowaage untersucht werden, oder es werden Versuche an kleineren Betonproben, beispielsweise an 10-cm- und 20-cm-Würfeln oder an Platten von 20 cm x 20 cm x 12 cm Kantenlänge, in Trockenschränken, Autoklaven oder Muffelöfen durchgeführt, in denen die Proben bei einzelnen Temperaturstufen über längere Zeit gelagert werden. Da in diesen Geräten die Atmosphäre nicht beeinflussbar ist, können neben der Entwässerung auch noch andere das Gewicht beeinflussende chemische Vorgänge, wie z. B. Kohlendisäureaufnahme und -abgabe, auftreten. Aus diesem Grunde verlieren diese Versuche bei Temperaturen, die nennenswert über 600 °C hinausgehen, zunehmend an Aussagekraft.

Den Rohdichteverlauf bei höheren Temperaturen als Ergebnis einer solchen Untersuchung im Muffelofen an 10-cm-Würfeln aus Normalbeton mit 16 mm Größtkorn zeigt Bild 5. Die Probekörper lagerten nach 28 Tagen Normlagerung bis zum Versuchsbeginn im Alter von etwas mehr als zwei Jahren im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte. Aus dem Rohdichteverlauf, der Be-

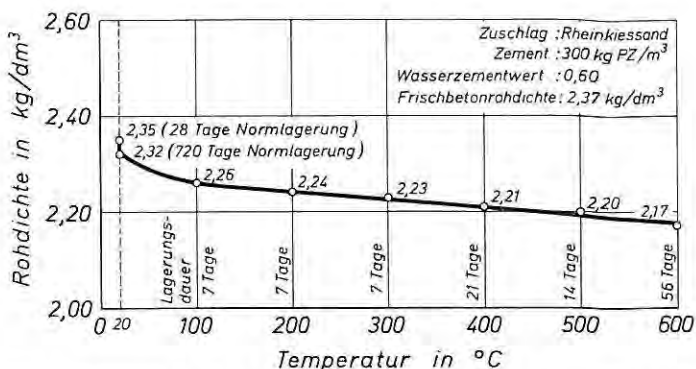


Bild 5 Rohdichte eines Normalbetons bei höheren Temperaturen (ermittelt an 10-cm-Würfeln bei Lagerung bis zur technischen Gewichtskonstanz)

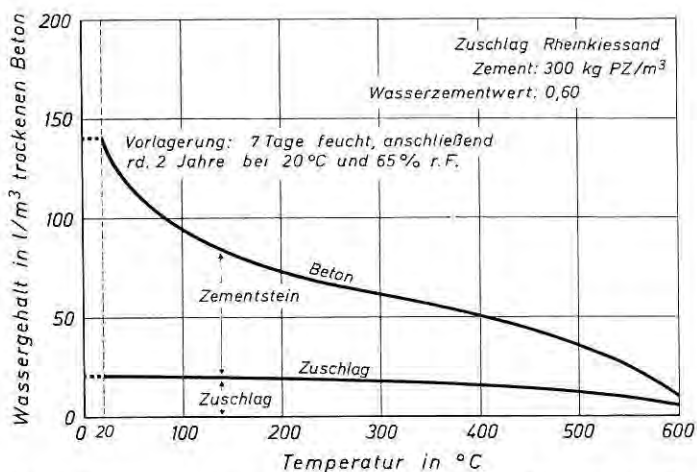


Bild 6 Wassergehalt eines Normalbetons bei höheren Temperaturen (bezogen auf 10-cm-Würfel bei Lagerung bis zur technischen Gewichtskonstanz)

stimmung des Wassergehalts am Beginn und am Ende der Lagerung auf chemischem Wege und analogen Untersuchungen an entsprechendem Zuschlag ist in Bild 6 der Wassergehalt für diesen Beton in Abhängigkeit von der Temperatur angegeben.

Betrachtet man den Anteil an Wasser, der auf den Zementstein entfällt, gesondert, so stellt man fest, daß die Werte noch deutlich über dem Wassergehalt liegen, der sich bei stufenweise konstantgehaltener Temperatur nach Bild 3 ergeben müßte. Hieraus ist zu folgern, daß bei einem 10-cm-Würfel eine mehrwöchige Lagerung bei den einzelnen Temperaturstufen — trotz Erreichens der technischen Gewichtskonstanz (Gewichtsabnahme in 24 Stunden \leq 0,01 %) — noch nicht ausreicht, um denjenigen Wert für den

Wassergehalt zu erreichen, der auch bei praktisch unendlich langer Temperatureinwirkung nicht unterschritten wird.

Wenn zum Erreichen des Kleinstwertes für den Wassergehalt bei einem 10-cm-Würfel schon eine sehr lange Temperatureinwirkung notwendig ist, erhebt sich die Frage, ob bei größeren Bauteilabmessungen dieser Kleinstwert überhaupt während der Lebensdauer des Bauwerks erreicht wird. Versuche zum Feuchtigkeitstransport in massigen Bauteilen sind bisher nur bei Temperaturen, die unter 100 °C liegen oder nicht sehr weit über 100 °C hinausgehen, durchgeführt worden [21, 22]. Diese Versuche deuten an, daß bei Bauteilabmessungen, die nennenswert über 1 m hinausgehen, der Feuchtezustand, der einer kleinen Betonprobe entspricht, sich innerhalb einiger Jahrzehnte nicht einstellen wird. Auf der anderen Seite scheint es jedoch noch nicht möglich, den zeitlichen Verlauf des Wassergehalts bei höheren Temperaturen in Abhängigkeit von den Bauteilabmessungen, den Umgebungsbedingungen und der Betonzusammensetzung genau anzugeben. Aus diesem Grunde muß für die praktische Anwendung meist eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung des Wassergehalts von Beton bei höheren Temperaturen vorgenommen werden.

Bei der Beurteilung der Abschirmwirkung von Beton gegenüber Neutronenstrahlen bei dauernder Einwirkung höherer Temperaturen führt beispielsweise der Wassergehalt, der sich bei stufenweise konstantgehaltener Temperatur an einer pulverförmig aufbereiteten Betonprobe ergibt, zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen. Ähnliche Ergebnisse dürfte die versuchsmäßige Bestimmung des Wassergehalts des trockenen (getrockneten) Betons und die Berechnung des Wassergehalts bei höheren Temperaturen aus dem Verhalten des Zementsteins (Bild 3) und gegebenenfalls des Zuschlags ergeben.

Für Beton ohne kristallwasserhaltigen Zuschlag ist in vielen Fällen eine Abschätzung des Wassergehalts aus dem Zementgehalt, den Richtwerten für das gebundene Wasser in trockenem Zementstein (Tafel 1) und dem Entwässerungsverhalten des Zementsteins (Bild 3) ausreichend.

Für einen Normalbeton, der aus Portlandzement PZ 350 F und Rheinkiesand der Sieblinie A/B 16 bei einem Zementgehalt von 300 kg/m³ Beton mit einem Wasserzementwert von 0,50 hergestellt wurde, lassen sich beispielsweise für eine Betriebstemperatur von 300 °C nach 28 Tagen Normlagerung folgende Werte für den Wassergehalt angeben.

Mit dem Zementgehalt von 300 kg/m³ Beton und dem Richtwert von 0,17 für das gebundene Wasser in trockenem Zementstein nach Tafel 1 läßt sich der Wassergehalt des trockenen Betons näherungsweise mit $300 \cdot 0,17 = 51 \text{ l/m}^3$ angeben. Für eine Betriebstemperatur von 300 °C ergibt sich nach Bild 3 noch 55 % des Gehalts an gebundenem Wasser des trockenen Zementsteins, d. h. der Wassergehalt läßt sich zu $0,55 \cdot 51 = 28 \text{ l/m}^3$ abschätzen. Die versuchsmäßige Bestimmung des Wassergehalts des trockenen Betons auf chemischem Wege ergab 2,5 Gew.-%. Mit diesem Wert und der Trockenrohddichte des Betons von 2,31 kg/dm³ errechnet sich der Wassergehalt des trockenen Betons zu 58 l/m³. Dieser

versuchsmäßig bestimmte Wert von 58 l/m^3 liegt über dem theoretisch aus dem Zementgehalt abgeschätzten Wert von 51 l/m^3 . Der Grund hierfür liegt in dem Beitrag des Zuschlags zum Wassergehalt des Betons; für den verwendeten Rheinkiessand wurde auf chemischem Wege ein Wassergehalt von 0,8 Gew.-% ermittelt. Unter Vernachlässigung des vom Zementstein abweichenden Verhaltens des Zuschlags ergibt sich für eine Betriebstemperatur von $300 \text{ }^\circ\text{C}$ der Wassergehalt des Betons zu $0,55 \cdot 58 = 32 \text{ l/m}^3$. Schließlich ergab sich auf chemischem Wege der Wassergehalt einer bei $300 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zur näherungsweise Gewichtskonstanz gelagerten pulverfein aufbereiteten Probe zu 1,5 Gew.-%; mit diesem Wert und der Rohdichte des Betons nach Lagerung bei $300 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zur technischen Gewichtskonstanz von $2,29 \text{ kg/dm}^3$ ergibt sich der Wassergehalt zu 34 l/m^3 . Dieser Wert für den Wassergehalt des Betons bei einer Betriebstemperatur von $300 \text{ }^\circ\text{C}$ (Lagerung bis zur Gewichtskonstanz) dürfte die wirklichen Verhältnisse am besten widerspiegeln, da auch das Verhalten des Zuschlags versuchsmäßig erfaßt wurde.

Der versuchsmäßig bestimmte Wassergehalt des Betons für eine Betriebstemperatur von $300 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt mit 34 l/m^3 über dem Wert von 32 l/m^3 , der aus dem versuchsmäßig bestimmten Wassergehalt des trockenen Betons und dem Verhalten des Zementsteins abgeleitet wurde. Der Grund hierfür kann in der Tatsache liegen, daß für den letztgenannten Wert nicht berücksichtigt wurde, daß normaler Zuschlag bei höheren Temperaturen als Zementstein entwässert.

4. Zusammenfassung

Der Gehalt an gebundenem Wasser in trockenem (getrocknetem) Beton setzt sich zusammen aus dem im Zementstein und Zuschlag enthaltenen Wasser. Als größter Gehalt gebundenen Wassers im Zementstein kann der Wert von 24 Gew.-% (bezogen auf den Zement) gelten. Unter baupraktischen Bedingungen wird dieser Grenzwert in der Regel nicht erreicht. Der Wassergehalt von Zementstein bei höheren Temperaturen kann unabhängig von der Zusammensetzung der Normzemente einheitlich abgeschätzt werden.

Der Gehalt an gebundenem Wasser ist bei normalem Zuschlag gering. Bei Kiessand liegt er meist zwischen 0,5 und 2,0 Gew.-%, einen wesentlich höheren Wassergehalt haben lediglich besondere Zuschläge, wie zum Beispiel Limonit und Serpentin. Für die praktische Anwendung muß bei diesen Zuschlägen mit höherem Kristallwassergehalt das spezielle Entwässerungsverhalten berücksichtigt werden.

Der Wassergehalt von Beton (Zementstein, Zuschlag) bei höheren Temperaturen läßt sich aus thermogravimetrischen Versuchen ableiten oder auf chemischem Wege an thermisch vorbehandelten Proben bestimmen. Für praktische Belange reicht jedoch vielfach auch eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung aus dem allgemeinen Verhalten des Zementsteins und gegebenenfalls auch des Zuschlags aus.

SCHRIFTTUM

- [1] Powers, T. C., und T. L. Brownyard: Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. Proc. Amer. Concr. Inst. 43 (1947) S. 101/132, 249/336, 469/504, 549/602, 669/712, 845/880, 933/992; ebenso PCA Res. Dep. Bull. 22.
- [2] Powers, T. C.: Physical properties of cement paste. Proc. 4. Internat. Symp. Chemistry of Cement, Washington D. C. 1960, Vol. 2, Nat. Bur. Stand. Monogr. 43, Washington D. C. 1962, S. 577/609; ebenso PCA Res. Dep. Bull. 154.
- [3] Verbeck, G. J., und R. H. Helmut: Structures and physical properties of cement pastes. Proc. 5. Internat. Symp. Chemistry of Cement, Tokyo 1968, Vol. 3, Tokyo 1969, S. 1/32.
- [4] Copeland, L. E., und D. L. Kantro: Chemistry of hydration of portland cement at ordinary temperature. The Chemistry of Cements, Vol. 1, Academic Press, London—New York 1964, S. 313/370.
- [5] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure, 2. Auflage, Bauverlag, Wiesbaden—Berlin 1964, S. 39/49.
- [6] Locher, F. W.: Chemie des Zements und der Hydratationsprodukte. Zement-Taschenbuch 1974/75, Bauverlag, Wiesbaden—Berlin 1974, S. 37/44.
- [7] Brunauer, S., und D. L. Kantro: The hydration of tricalcium silicate and β -dicalcium silicate from 5 °C to 50 °C. The Chemistry of Cements, Vol. 1, Academic Press, London—New York 1964, S. 287/309.
- [8] Arnds, W.: Der Porenraum im Zementstein — seine Entstehung und sein Einfluß auf die Druckfestigkeit, Betonstein-Zeitung 28 (1962) H. 3, S. 112/121; ebenso Dissertation TH Aachen 1959.
- [9] Wischers, G.: Einfluß einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstein und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen verschiedener Wärmedehnung. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 28, Düsseldorf 1961; ebenso Dissertation TH Aachen 1961.
- [10] Schlotmann, B.: Grundlagen der Betonherstellung mit vorgemischtem Zementleim. Dissertation TH Aachen 1962.
- [11] Manns, W.: Über den Einfluß der elastischen Eigenschaften von Zementstein und Zuschlag auf die elastischen Eigenschaften von Mörtel und Beton. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 2112, Westdeutscher Verlag, Köln—Opladen 1970; ebenso Dissertation TH Aachen 1969.
- [12] Wischers, G., und O. Hallauer: Einfluß und Bestimmung der Eigenfeuchte von Betonzuschlagstoffen. beton 16 (1966) H. 5, S. 207/211, und H. 6, S. 249/253; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 89/113.
- [13] Manns, W.: Zuschlag für Strahlenschutzbeton (Schwerzuschlag). Zement-Taschenbuch 1974/75, Bauverlag, Wiesbaden—Berlin 1974, S. 172/181.
- [14] D'Ans-Lax: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Bd. 1, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1967, S. 966.
- [15] Verein Deutscher Zementwerke e. V.: Analysengang für Zemente. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 37, Beton-Verlag, Düsseldorf 1970.
- [16] Glasser, F. P., und H. F. W. Taylor: Thermal weight change curves. The Chemistry of Cements, Vol. 2, Academic Press, London—New York 1964, S. 335/342.
- [17] Turriziani, R.: The calcium aluminates hydrates and related compounds. The Chemistry of Cements, Vol. 1, Academic Press, London—New York 1964, S. 233/280.
- [18] Taylor, H. F. W.: The calcium silicate hydrates. The Chemistry of Cements, Vol. 1, Academic Press, London—New York 1964, S. 167/232.
- [19] Taylor, H. F. W.: Etudes sur l'hydratation du ciment portland. 27. Internat. Congress on Industrial Chemistry, Brussels 1954, Vol. 3 (1954) S. 63/66.

- [20] Schmitt, H. C.: Über die Kalkbindung durch Hochofenschlacke bei der hydraulischen Erhärtung von Schlackenzementen. Zement-Kalk-Gips 16 (1963) H. 8, S. 321/324.
- [21] England, G. L., und A. D. Ross: Shrinkage, moisture and pore pressures in heated concrete. Concrete for Nuclear Reactors, Vol. 2, Amer. Concr. Inst. Spec. Publ. SP-34, Detroit 1972, S. 883/907.
- [22] Yuan, R. L., H. K. Hilsdorf und C. E. Kesler: The effect of temperature on the drying of concrete. Concrete for Nuclear Reactors, Vol. 2, Amer. Concr. Inst. Spec. Publ. SP-34, Detroit 1972, S. 991/1017.