

# Langzeitverhalten von feuerverzinktem Betonstahl in Leichtbeton

Zusammenfassende Darstellungen von Untersuchungen nach 1, 2½, 4 und  
10 Jahren

Bericht Nr. 147  
des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.  
GAV-Nr. FA 20

---

Dieser zusammenfassende Bericht basiert auf den Ergebnissen verschiedener Forschungsprojekte, die vom Bundesminister für Wirtschaft (BMWi), der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) und aus Eigenmitteln des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. gefördert wurden.

## 1. Grundlagen

Normalbeton weist bekanntlich auch Eigenschaften auf, die für manche Anwendungsfälle nicht hingenommen werden können, so das hohe Eigengewicht und die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit. Dies hat vor Jahren zur Entwicklung der leichten Betone geführt. Als Leichtbetone werden i.a. alle Betone bezeichnet, deren Rohdichte < 2 t/m<sup>3</sup> beträgt. Dabei werden die Rohdichten vor allem über Art, Menge und Kornklassen bzw. Verteilung der Zuschläge eingestellt. Mit der Abnahme der Rohdichte (Zunahme der Porosität der Zementsteinmatrix und der Zuschläge) werden - je nach Zuschlagart und Anteil des porigen Zuschlags - die wärmedämmenden Eigenschaften i.a. verbessert.

Leichtbeton wird aus hydraulischen Bindemitteln (Zement), Wasser, u.U. porositäerzeugenden Zusätzen und zumeist porösen Zuschlägen aus künstlich erzeugten oder natürlichen Gesteinen hergestellt. Bei der Anwendung des Leichtbetons haben sich im wesentlichen zwei Sorten durchgesetzt:

Konstruktionsleichtbeton (gefügedicht),  
wärmedämmender Leichtbeton (nichtgefügedicht): Haufwerksporiger Beton, Porenbeton (Gas- und Schaumbeton).

Alle Leichtbetonarten können je nach Anwendungsfall bewehrt werden (Abb. 1).

Bei den nicht gefügedichten Leichtbetonen steht die Wärmedämmung im Vordergrund. Da die Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit etwa 0,50 kcal/(m·h) etwa 25 mal größer ist als von ruhender Luft, nimmt diese mit steigendem Wassergehalt des Betons zu. Feuchtigkeit in porösen Baustoffen verschlechtert somit den Wärmeschutz.

In einem bewehrten, nichtgefügedichten Leichtbeton ohne Witterungsschutz im Freien ist ein Korrosionsschutz der Stahleinlagen nicht gege-

ben, bzw. ein solcher ist zumindest nicht ausreichend. Selbst in einem derartigen Beton mit Außenschutz kann Bewehrungsstahlkorrosion auf Dauer nicht ausgeschlossen werden, da ein aktiver Korrosionsschutz durch Passivierung bei einigen Sorten entfällt und auch der physikalische Schutz im Verhältnis zu den gefügedichten Betonen vergleichsweise niedrig ist. Dies hat zu der Entwicklung geführt, daß

Leichtbeton mit offenem bzw. porigem Gefüge, vor allem als bewehrter Beton in korrosiver Umgebung (in der Atmosphäre) nur begrenzt eingesetzt wird,

oder versucht wird, den Stahl zusätzlich vor Korrosion zu schützen.

Bereits zu einem früheren Zeitpunkt wurde die Eignung des Feuerverzinkens für diesen Bereich untersucht. Hierzu wurden mit unverzinkten und feuerverzinkten Betonstählen bewehrte Normal- und Leichtbetonkörper unter typischen Umweltbedingungen ausgelagert. Nach 1 und 2,5 und 4 Jahren wurden die Stähle hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens untersucht. Zusätzlich wurden auch die notwendigen physikalischen und chemischen Parameter wie z.B. Porosität, Wasserhaushalt, Karbonatisierung und Chlorideindringung zwecks Erklärung bzw. Bewertung der Korrosion ermittelt [1-3].

Der nachfolgende Bericht basiert auf den damaligen Untersuchungen und fügt die damaligen Ergebnisse zusammen. In einem weiter geführten Langzeitversuch erfolgte die Auslagerung ausgewählter Proben aus Eigenmitteln des GAV. Nach einer Auslagerungszeit von nunmehr insgesamt 10 Jahren wurde eine abschließende Untersuchung und Auswertung von Proben durchgeführt, über diese Ergebnisse wird ebenfalls berichtet.

## 2. Korrosionsschutz von Stahl in Leichtbeton

Aufgrund der gegebenen Voraussetzungen ist es erforderlich, die Bewehrung in nichtgefügedichtem Leichtbeton in besonderer Weise vor Korrosion zu schützen. Anderenfalls würde bei Bauteilen im Freien Korrosion auch dann einsetzen, wenn die Betonoberflächen behandelt wurden und der Eintritt von Niederschlagswasser auszuschließen ist /3/. Im Fall von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge wird i.a. davon ausgegangen, daß - vergleichbar den Verhältnissen

in Normalbeton - für den normalen Anwendungsfall ein ausreichender Korrosionsschutz gegeben ist. Nur in Sonderfällen wäre die Bewehrung zusätzlich zu schützen.

Die besondere Herstellung und Struktur der porösen Leichtbetone stellt an zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen in Form von Schutzschichten auf dem Stahl besondere Anforderungen:

Schutzsysteme müssen auf der Bewehrung und im umschließenden Beton ausreichend haften.

Bei der Herstellung von Porenbetonen in Autoklaven sind Temperaturen bis 180°C und Drücke bis 12 at möglich. Es herrschen somit Bedingungen mit hohen Temperaturen und Feuchtegehalten vor, denen die Schutzsysteme standhalten müssen.

Eine ausreichende Alkalitäts- und Alterungsbeständigkeit wird ebenfalls vorausgesetzt.

Während der Nutzung ist wegen der höheren "offenen" Porosität mit einer gegenüber Normalbeton erhöhten Einwirkung von Sauerstoff und je nach Anwendungsfall, zumindest zeitweise auch von Wasser zu rechnen.

Neben einer Anzahl von Korrosionsschutzsystemen auf der Basis bituminöser Stoffe oder auf Polymerbasis können auch Zinküberzüge, die durch Feuerverzinken hergestellt werden, einen brauchbaren Schutz vor Korrosion in diesem Bereich entwickeln.

### 3. Versuchsmaterialien

In früheren Untersuchungen [1] wurden feuerverzinkte Bewehrung in verschiedenen Leichtbetonen untersucht.

#### 3.1. Bewehrungsstahl

Untersucht wurden Betonstähle der Sorte BST 500 G, Durchmesser 8,0 mm, aus unlegiertem, niedriggekohltem Stahl (Werkstoff-Nr. 1.0464) im unverzinkten und feuerverzinkten Zustand. Die Stähle wurden durch warmwalzen und anschließender Kaltumformung hergestellt und wiesen aus versuchstechnischen Gründen (Messung der Zinkauflage nach Korrosion) eine glatte und nicht die sonst übliche gerippte Oberfläche auf.

Die Feuerverzinkung erfolgte durch senkrechtes Eintauchen 2 m langer Abschnitte in ein Zinkbad; die Tauchdauer betrug 2 Minuten. In die Auswertung des Korrosionsverhaltens wurden nur die Abschnitte 0,8 bis 1,6 m von oben einbezogen, die eine mittlere Zinkauflage von 145 µm (1036 g/m<sup>2</sup>) ± 2 µm aufwiesen.

#### 3.2 Beton

Es wurden typischen Vertreter der bekannten Leichtbetonsorten und zum Vergleich auch Normalbeton hergestellt und untersucht.

Normalbeton	B 25
Konstruktionsleichtbeton	LB 25
Haufwerksporenbeton	LB 8
Gasbeton	GB 3.3
Schaumbeton	

Bei dem Konstruktionsleichtbeton und dem haufwerksporigen Beton (HpB) wurden auch Mischungen hergestellt, bei denen durch Zugabe von KOH zum Anmachwasser der pH-Wert des

Festbetons von üblicherweise ca. pH 13,0 - 13,3 bis zu ca. 13,6 erhöht wurde. Hierdurch sollte der besonderen Empfindlichkeit der feuerverzinkten Bewehrung in hochalkalischen Porenlösungen nachgegangen werden.

Hinsichtlich der Zusammensetzung der Leichtbetone gelten folgende Gesichtspunkte:

#### Konstruktionsleichtbeton (KLB)

Durch Verwendung von Zement, Wasser und Zuschlagstoffen aus porigem Gestein und einer Kornzusammensetzung vergleichbar Normalbeton wurde ein gefügedichter Leichtbeton hergestellt. Bei dieser Leichtbetonart werden die Zuschlagstoffe von Zementleim vollständig umhüllt.

#### Haufwerksporiger Beton (HpB)

Durch Verwendung von Zement, Wasser und Zuschlagstoffen aus porigem Gestein ohne Kornabstufung wurde Leichtbeton mit Haufwerksporen hergestellt. Der Bindemittelgehalt wird bei dieser Betonart beschränkt. Hierdurch entsteht ein Leichtbeton mit Makrohohlräumen zwischen den Zuschlägen. Die Verkittung der Körner erfolgt an deren Berührungsstellen.

Die Porenbetone werden nach der Art der Porenbildung in Gas- und Schaumbeton unterteilt. Sie sind gekennzeichnet durch ein zellenartiges Gefüge mit zahlreichen feinen Gas- oder Luftporen.

### Gasbeton (GB)

Der Gasbeton wurde durch Zugabe eines Treibmittels (Gasbildner) in ein frisches Gemisch von Zement, Kalk, Wasser und Feinsand hergestellt. Im erhärteten Zustand bildete sich ein Zellengefüge aus. Das Treibmittel reagiert aufgrund seines amphoteren Verhaltens mit dem Alkaligehalt des Bindemittels, wobei Wasserstoff frei wird.

### Schaumbeton (SB)

Der luftgehärtete Schaumbeton wurde durch Zugabe von vorgefertigtem Schaum in ein frisches Gemisch von Zement, Wasser und Feinsand hergestellt. Im erhärteten Zustand bildete sich ein Zellengefüge aus.

### 3.3. Versuchskörper

Unter Verwendung der verschiedenen Leichtbetonsorten wurden mit unverzinktem und feuer-

verzinktem Stahl bewehrte Stahlbetonteile der Abmessung  $L \times B \times H = 100 \times 62,5 \times 25$  cm gefertigt. Parallel zur Fläche  $L \times B$  wurden Proben mit Betondeckungen von 1,5 - 2,5 - 5,0 und 8,0 cm eingelegt. Es wurden insgesamt 70 Versuchskörper hergestellt. Ein Teil der Probekörper aus Normal- und Konstruktionsleichtbeton wurden künstlich vorkarbonatisiert. Diese Körper wurden in einem Zelt in 3%iger  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre gelagert und bis zu 300 Tagen dort belassen. In dieser Zeit erreichte die Karbonatisierungstiefe die erste Bewehrungslage.

Bei dem autoklavenbehandelten Gasbeton bedeutet normale Alkalität ein pH-Wert bei 10, der zum Korrosionsschutz nicht ausreicht.

Unter karbonatisiert wird im Bericht stets eine durch Einwirkung eines erhöhten bzw. normalen  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre eintretende pH-Abminderung verstanden. Karbonatisierter Beton weist einen pH-Wert um 8,3 auf.

## 4. Korrosionsversuche

Die Probekörper wurden unter folgenden Bedingungen ausgelagert:

Im Freien unter Dach: Die Bauteile unterliegen den üblichen Schwankungen der relativen Feuchte, sind jedoch keinen Niederschlägen ausgesetzt. In Stuttgart beträgt die jährliche mittlere relative Luftfeuchte 75 % und die mittlere Temperatur  $10^\circ\text{C}$ .

Im Freien: Die Bauteile sind der normalen Bewitterung ausgesetzt. In Stuttgart betragen die jährlichen Niederschläge  $630 \text{ l/m}^2$  (Mittelwert 1990/91).

In einem Klimaraum mit 100 % relativer Feuchte und  $20^\circ\text{C}$ .

Im Freien mit Chloridbeaufschlagung: Dabei wird in Wasser gelöstes Chlorid (1,5 Mass.-%)

%) auf die Betonoberfläche aufgesprüht (Abb. 2). In Anlehnung an die typische Zusammensetzung von Streusalz besteht das Chlorid zu etwa 87 % aus  $\text{NaCl}$  und 13 %  $\text{CaCl}_2$ . Es wurden zwei Behandlungen gewählt:

a - 50 Sprühungen mit  $5 \text{ g Salz/m}^2$  verteilt auf 25 Tage im Sommer und 25 Tage im Winter (Chlorid 1)

b - 150 Sprühungen pro Jahr mit  $5 \text{ g Salz/m}^2$  in regelmäßigen Abständen (Chlorid 2).

Die Behandlung Chlorid 1 orientiert sich an Chloridbelastungen von Bauwerken durch Streusalze (Spritzwasser). Die Behandlung Chlorid 2 ist bei Leichtbeton sicherlich nicht im Hinblick auf baupraktische Verhältnisse gewählt worden. Sie dient lediglich der Verdeutlichung der Grenzen des Korrosionsschutzes im Medium Leichtbeton.

## 5. Korrosionsverhalten

### 5.1 Äußeres Erscheinungsbild der Versuchskörper

Auf der Oberfläche der mit Chloriden beaufschlagten, bewehrten Betonkörper traten während der Auslagerung und mit der Zeit zunehmend Risse entlang der Bewehrungsstäbe auf.

Diese Risse sind auf die Sprengwirkung von Eisen- bzw. Zinkkorrosionsprodukten zurückzuführen. Die Erscheinung der Betonrißbildung über korrodierenden Bewehrungsstählen in chloridhaltigem Beton ist bekannt. Bisher wurde für bewehrten Normalbeton in der Regel festgestellt, daß Rißbildung über feuerverzinktem Stahl

später Eintritt als über unverzinktem, jedoch wurden auch gegenteilige Feststellungen getroffen.

Bei den hier durchgeführten Auslagerungsversuchen in einem verhältnismäßig porösen Normalbeton und den verschiedenen Leichtbetonen traten Risse bei der Chloridbeanspruchung 1 (Chlorid 1) bzw. 2 (Chlorid 2) ab etwa 18 Monaten bzw. 12 Monaten auf, wobei diese Rißbildung eher bei feuerverzinktem und später auch über unverzinkten Stahl erfolgte. In der Regel erfolgte die Rißbildung im Beton über der gesamten Stablänge von 90 cm. Man erkennt, daß:

die Rißbildung über den verzinkten Stäben deutlich ausgeprägter ist und erwartungsgemäß mit steigender Betondeckung abnimmt.

Die Risse werden mit steigendem Chloridgehalt und somit zunehmender Metallkorrosion breiter. Der Zinkabtrag ist jedoch kein alleiniges Kriterium für Betonrißbildung, da in chloridfreiem Beton (Gasbeton) trotz beträchtlichem Zinkabtrag keine Betonrißbildung eintrat.

Über unverzinktem Stahl traten vor allem in gefügedichteren Betonen Risse auf.

Aufgrund der bisherigen Feststellungen ist davon auszugehen, daß sowohl die chloridhaltigen Korrosionsprodukte des Eisens als auch jene des Zinks ein größeres Volumen aufweisen als das jeweilige Metall selbst: Während jedoch die Korrosionsprodukte des Eisens dem entstehenden Druck ausweichen können (in porösem Beton mehr als in dichteren), trifft dies für die Zinkkorrosionsprodukte offenbar nicht zu. Dies erklärt, warum vor allem in den poröseren Betonen (Normalbeton sehr geringer Güte, Leichtbeton) sich über korrodierenden verzinkten Stählen eher Risse bilden als über korrodierenden unverzinkten.

## 5.2 Intensität der Bewehrungsstahlkorrosion

### 5.2.1 Unverzinkte Stähle

Nach 1, 2,5 und 4 Jahren wurden Stahlproben aus den Betonkörpern ausgebaut und nach Reinigung (Beizen in inhibierter, verdünnter Salzsäure) hinsichtlich Art und Umfang einer Korrosion beurteilt. Es wurden Korrosionsgrade 0 bis 5 definiert, bei welchen die Narbentiefe (Mittelwert der 3 tiefsten Narben auf ca. 0,9 m Probenlänge), der mittlere Stahlabtrag ermittelt über Gewichtsverlustmessungen und die Ausdehnung der korrodierten Oberfläche berücksichtigt wurden. Die Narbentiefe wurde mittels eines spezi-

ellen Tastgerätes mit angeschlossener Meßuhr ermittelt.

Der Korrosionsgrad wurde in Abhängigkeit von der Betonart, der Betondeckung, den Auslagerungsbedingungen und der Auslagerungsdauer (nur 2 Auslagerungsarten) ermittelt.

### Betonart

Der Einfluß der Betonart auf die Stahlkorrosion ist für alle Behandlungszustände vergleichbar. Mittelt man z.B. die Korrosionsgrade für die Ergebnisse nach 2,5 Jahren für die Betondeckungen 1,5-2,5-5,0 cm und schließt den Extremfall Chloridbehandlung 2 aus, dann verhalten sich die Korrosionsintensitäten etwa wie folgt

NB : SB : KLB : HpB : GB = 1 : 2 : 3 : 8 : 13

Demnach verhalten sich die ungeschützten Stähle in haufwerksporigem Beton und insbesondere in Gasbeton besonders ungünstig. Dies ist mit der hohen offenen Porosität dieser Betone zu erklären. Es ist auch ein Hinweis darauf, daß insbesondere in diesen Betonen, unabhängig von der Betondeckung (s.u.), alle Stähle zusätzlich vor Korrosion geschützt werden müssen, falls die Bauteile der Bewitterung und einer Chloridbeanspruchung ausgesetzt sind.

Bei Konstruktionsleichtbeton LB 25 wurde für alle wesentlichen Behandlungszustände, also z.B. Karbonatisierung des Betons der 1. Bewehrungslage und Chloridbeaufschlagung, eine stärkere Korrosion festgestellt als bei dem Normalbeton B 25 vergleichbarer Güte (Betonfestigkeit). Deshalb empfiehlt sich bei konstruktivem Leichtbeton ein zusätzlicher Korrosionsschutz, wenn bei Bauteilen im Freien geringe Betondeckungen um 1,5 cm nicht auszuschließen sind. Falls ein Chloridangriff stattfindet, sollte auch der Stahl in 2,5 cm Tiefe geschützt werden. Die vergleichsweise starke Chloridkorrosion im Konstruktionsleichtbeton im Vergleich zum Normalbeton dürfte auf die inhomogenere Struktur des Leichtbetons und Mikrokorrosionselemente zurückzuführen sein.

In Schaumbeton verhält sich ein ungeschützter Stahl ähnlich wie in einem Normalbeton niedriger Güte bei geringerer Betondeckung. Dies ist mit den Porositätsverhältnissen beider Betone zu erklären. Es empfiehlt sich bei ungeschützten Bauteilen im Freien ohne und mit Chloridbeanspruchung, die Bewehrung in Schaumbeton stets bis in 2,5 cm Tiefe zu schützen.

### Betondeckung

Bei dem Normal-, Konstruktionsleicht- und Schaumbeton nimmt die Korrosion erwartungsgemäß mit zunehmender Betondeckung ab. Dies ist vor allem auf den Einfluß der Karbonatisierung und Chlorideindringung zurückzuführen: Nur in jenen oberflächennahen Bereichen, die karbonatisiert sind und/oder ausreichend hohe Chloridgehalte aufweisen, findet ein Korrosionsangriff statt.

Bei haufwerksporigem Beton und Gasbeton ist die Korrosion nur gering bzw. gar nicht von der Betondeckung abhängig. Beide Betone sind struktur- bzw. herstellungsbedingt, zumindest örtlich, auch in größeren Betontiefen karbonatisiert. Sie enthalten bei Bewitterung in allen Querschnittsbereichen in ausreichendem Maße Wasser und die Sauerstoffdiffusion ist nicht behindert.

### Auslagerungsbedingungen

#### Im Freien unter Dach:

Hier tritt trotz Begünstigung der Karbonatisierung i.a. keine starke Korrosion ein, da der Wassergehalt auf Dauer zu gering ist. Korrosion ist nur bei porösen Betonen zu erwarten, die herstellungsbedingt größere mengen freien Restwassers enthalten. Es ist jedoch davon auszugehen, daß die Korrosionsgeschwindigkeit hier(nach Austrocknung) stark rückläufig ist. Genauere Aussagen sind nur aufgrund der Ergebnisse von Langzeitauslagerungen möglich. Auf einem zusätzlichen Korrosionsschutz kann bei Ausschluß von Wasser u.U. verzichtet werden. Dies gilt natürlich erst recht für Bauteile in Innenräumen.

#### Im Freien ungeschützt:

Hier ist grundsätzlich stärkere Korrosion als zuvor zu erwarten, falls die Stähle im karbonatisierten Bereich liegen. Bei Normal-, Konstruktionsleicht- und Schaumbeton ist die Karbonatisierung der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Der haufwerksporige und Gasbeton ist von Anfang an strukturabhängig karbonatisiert und der mittlere Wassergehalt bestimmt die Korrosion. Dieser ist bei Gasbeton aufgrund der Porosität und des Verhaltens bei der Wasseraufnahme und -abgabe höher als bei haufwerksporigem Beton.

#### 100 %relative Feuchte:

In Normal-, Konstruktions- und Schaumbeton sind in Luft von 100 % relativer Feuchte alle offenen Poren mit Wasser gefüllt. Deshalb findet in diesen Betonen auf Dauer keine Sauerstoffdiffusion und somit keine Korrosion statt. Dies gilt auch dann, wenn - z.B. nach vorheriger Karbonatisierung - theoretisch aktive Korrosion möglich wäre. Bei dem haufwerksporigen und Gasbeton sind bei 100 % relativer Feuchte die (gro-

beren) Poren nicht vollständig mit Wasser gefüllt. Es kann deshalb zusätzlich Sauerstoffdiffusion stattfinden. Da die Betone mehr oder weniger nicht alkalisch reagieren, ist die Korrosion hier stärker ausgeprägt als bei ungeschützter Lagerung im Freien und im Mittel trockeneren Betonen.

#### Chloridhaltiger Beton:

Der Korrosionsgrad der im Freien ungeschützt gelagerten Stahlbetonbauteile wird in dem Maße erhöht, wie Chloride zusätzlich an den Stahl gelangen. Bei den chloridbehandelten Proben ist lediglich zu beachten, daß der Normal- und Konstruktionsleichtbeton nicht zusätzlich künstlich karbonatisiert wurde.

In chloridhaltigem Beton im Freien (Chloridbehandlung 1) liegt die Korrosion bei Gasbeton und haufwerksporigem Beton in derselben Größenordnung wie bei chloridfreier Lagerung bei 100 % relativer Feuchte.

### 5.2.2 Feuerverzinkte Stähle nach 1 bzw. 2,5 Jahren

Nach 1 und 2,5 Jahren wurden auch die feuerverzinkten Stähle entnommen und nach mechanischer Entfernung anhaftender Betonreste und von Zinkkorrosionsprodukten im Hinblick auf einen Zinkabtrag ausgewertet. Der Zinkabtrag wurde über Gewichtsverlustmessungen festgestellt und durch metallographische Untersuchungen kontrolliert. Auch der mittlere Zinkabtrag von ca. 15 cm langen Abschnitten wurde nach Korrosionsgraden von 1 bis 5 beurteilt.

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgte vergleichbar jener bei den unverzinkten Stählen. Es wurde der Korrosionsgrad in Abhängigkeit von der Betonart, der Betondeckung, den Auslagerungsbedingungen und der Auslagerungsdauer ermittelt. Bei den verzinkten Stäben wurde zusätzlich noch die Alkalität des Betons (normal mit pH 13,0 - 13,3 und erhöht mit pH 13,6) variiert. In den Abbildungen sind wiederum die Definitionen für den Korrosionsgrad (Zinkabtrag) angegeben und die Versuchsergebnisse in tabellarischer Form dargestellt. Der Zinkabtrag Nr. 1 mit  $< 10\mu\text{m}$  ist eine normale, in jedem alkalischen Beton bis zur Deckschichtbildung stattfindende Zinkkorrosion. Selbst ein Zinkabtrag Nr. 2 ist nicht ungewöhnlich und wird z.B. in schwach chloridhaltigem oder karbonatisiertem Normalbeton festgestellt. Ein Zinkabtrag Nr. 3 war bereits deutlich erhöht und zeigt an, daß die Schutzwirkung der Verzinkung nur temporär ist. Bei einem Abtrag  $\geq 4$  kann nur von einer zeitlich sehr begrenzten Schutzdauer ausgegangen werden und diese Schutzvariante wäre, für den entsprechenden Anwendungsfall, nicht zu empfehlen (Abb. 3).

Bei Bauteilen im Freien (geschützt oder ungeschützt) und in dauerfeuchter Umgebung kann, mit Ausnahme des Sonderfalls Gasbeton, bei allen anderen gefügedichten oder nichtgefügedichten Betonen von einer dauerhaften Schutzwirkung ausgegangen werden. Hier empfiehlt sich somit eine Feuerverzinkung als zusätzlicher Korrosionsschutz. Die deutlichsten Verbesserungen sind beim haufwerksporigen Beton zu sehen, in welchem unverzinkter Stahl insbesondere in feuchterer Umgebung sehr unbeständig ist.

Die bekannte Tatsache, daß feuerverzinkte Bewehrung in hochchloridhaltigem Beton nur zeitlich begrenzt schützt, wurde auch in Leichtbeton, insbesondere in den nichtgefügedichten Sorten festgestellt. Erhöhte Chloridgehalte in der Stahlu Umgebung nahmen wie erwartet bei fallender Betondeckung und steigender Chloridbeanspruchung zu. Die 2,5jährigen Auslagerungen erlauben jedoch noch keine abschließende Wertung. Hier sollten die Ergebnisse der fortgesetzten Auslagerung abgewartet werden.

In Gasbeton wurde stets, weitgehend unabhängig von den Auslagerungsbedingungen und der Betondeckung, eine starke Zinkkorrosion festgestellt. Besonders ausgeprägt war der Zinkabtrag allerdings in chloridhaltigem Beton. Für eine Anwendung in autoklavenbehandeltem Gasbeton ist eine Feuerverzinkung deshalb nicht zu empfehlen.

Auch für den gefügedichten und nicht gefügedichten Leichtbeton konnte die für Normalbeton /25/ bekannte Tatsache bestätigt werden, daß durch eine hohe Alkalität des Zementsteins (z.B. als Folge der Verwendung besonders alkalischer Zemente) die Zinkkorrosion beschleunigt wird. Legt man den Zinkabtrag in  $\mu\text{m}$  zugrunde, dann wird dieser durch den pH-Anstieg des Zementsteins von 13,0 - 13,3 auf 13,6 etwa verdoppelt.

Mit der Dauer der Auslagerung nahm die Zinkkorrosion in folgenden Fällen zu

- bei Gasbeton unabhängig von der Art der Auslagerung und der Betondeckung,
- bei allen Betonen mit Chloridzugabe und niedrigen (chloridangereicherten) Betondeckungen.

Ansonsten wurde keine Zunahme der Zinkkorrosion ermittelt, was darauf hindeutet, daß Zinkkorrosion in abgegrenztem Umfang nur zu Beginn stattfindet, solange sich schützende Deckschichten noch nicht ausgebildet haben.

### 5.2.3 Feuerverzinkte Stähle nach 10 Jahren

Nach Ablauf von 10 Jahren wurden ausgewählte Probekörper einer weitergehenden Prüfung unterzogen. Obwohl die Probekörper durch Umsetzung an eine andere Stelle nicht mehr den selben Beanspruchungen ausgesetzt waren wie zu Beginn der Versuche, ergaben sich zusätzliche Erkenntnisse.

Es wurden die in der Tabelle 1, aufgeführten Versuchskörper geöffnet. Eingebaut wurden vor 10 Jahren feuerverzinkte Stähle, BSt 500 GK, Durchmesser 8 mm in Normalbeton, Konstruktionsleichtbeton, Haufwerksporigem- und Schaumbeton mit Betondeckungen von 15, 25, 50 und 80 mm. Anzumerken ist, daß die ausgewählten Proben nach der Auslagerung im Zeitraum 1989 bis 1992 mit Ausnahme des Normalbetons umgesetzt und nicht mehr der ursprünglichen Belastung unterworfen wurden.

#### 5.2.3.1 Durchgeführte Untersuchungen

Die in Tabelle 1 aufgeführten Proben wurden aufgebrochen. Der Zustand der verzinkten Stähle wurde nach dem Ausbau augenscheinlich untersucht und fotografisch dokumentiert. Verzinkte Stähle mit intaktem Überzug oder mit punktuell auftretendem Eisenrost wurden gereinigt und das Aussehen wiederum fotografisch festgehalten. Im Rasterelektronenmikroskop wurde der Zinkschichtaufbau typischer Proben untersucht und an metallografischen Schlifflinien die Restzinkschichtdicken bestimmt.

#### 5.2.3.2 Ergebnisse

Die Abbildungen 4 bis 7 zeigen Stababschnitte der entnommenen Proben. Beim Aufbrechen der Versuchskörper fiel auf, daß die Stähle auf der Ober- und Unterseite ein unterschiedliches Aussehen aufwiesen. Die Bilder sind daher wie folgt angeordnet: Im oberen Bild ist jeweils die Oberseite der Probe nach dem Ausbau und nachdem Reinigen dargestellt und im unteren Bild jeweils die Unterseite nach dem Ausbau und nach dem Reinigen (Oberseite ist der halbe Probenumfang mit der oben genannten Betondeckung).

In Tabelle 1 sind die Mittelwerte der Zinkschichtdickenmessungen zusammengestellt. Gemessen wurde an Längsschlifflinien (Oberseite bzw. Unterseite) und an Querschlifflinien.

Folgende Feststellungen wurden getroffen:

#### Normalbeton B 25:

Beim Ausbauen der Proben fiel auf, daß bei allen Betondeckungen auf der Oberseite kein Beton haften blieb, während auf der Unterseite Betonreste flächig anhafteten. Nach dem Reinigen war augenscheinlich kein signifikantes Unterschied in den Zinkschichten festzustellen. Es wurde in keinem Fall Stahlkorrosion vorgefunden. Die Restzinkschichtdicken sind in Tabelle 1 aufgeführt. Bei der Probe mit 80 mm Betondeckung war offenbar schon im Neuzustand eine erhöhte Zinkschichtdicke vorhanden. Die Carbonatisierungstiefe des Betons betrug 4 mm.

#### **Konstruktionsleichtbeton LB 25:**

Beim Konstruktionsleichtbeton lag die Probe mit 15 mm Betondeckung in einem ca. 0,5mm breiten Riß. Die Zinkschicht war über die gesamte Probenlänge bzw. den –umfang abgetragen und der Stahluntergrund wies bereits Abzehrungen auf. Bei 25 mm Betondeckung war die Zinkschicht auf der Probenunterseite punktuell durchbrochen. Die höheren Betondeckungen von 50 und 80 mm zeigten wiederum bei der Entnahme nur auf der Unterseite anhaftende Betonreste. Nach dem Reinigen fand sich bei 50 mm nur noch ein Korrosionspunkt und bei 80 mm Betondeckung war keine Stahlkorrosion mehr vorhanden. Die Carbonatisierungstiefe des Betons betrug 17 bis 22mm.

#### **Haufwerksporiger Beton LB 8, erhöhte Alkalität:**

Beim Aufbrechen der Versuchskörper blieben Reste des Zementsteins und der Zuschlagstoffe aus porigem Ton an der Stahlprobe haften. Die Probe mit 15 mm Betondeckung zeigte auf der Oberseite keine und auf der Unterseite punktuelle Stahlkorrosion. Bei der zweiten Bewehrungslage mit 25 mm waren sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite punktförmige Korrosionsstellen vorhanden. Die Proben mit den höheren Betondeckungen waren ohne Stahlkorrosion. Die Restzinkschichtdicken sind ebenfalls wieder Tabelle 1 zu entnehmen.

#### **Haufwerkporiger Beton LB 8, künstlich vorcarbonatisiert:**

Im vorcarbonatisierten, haufwerksporigen Beton blieben, wie bereits oben erwähnt, ebenfalls wieder Reste von Zementstein und Zuschlags

stoffen an der Probe haften. Die Reste waren jedoch voluminöser als im oben genannten Fall. Nur in einem Probenabschnitt wurde bei der Betondeckung von 25 mm punktuelle Stahlkorrosion festgestellt. Beiden Meßergebnissen der Zinkschichtdicke in Tabelle 1 wurde dieser Punkt vernachlässigt.

Bei der Entnahme der Proben in Schaumbeton waren alle Stähle mit anhaftendem Beton umhüllt. Nach dem Reinigen war nur bei der Betondeckung von 15 mm punktuelle Stahlkorrosion feststellbar. Die Restzinkschichtdicken sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Sowohl der Haufwerksporige- als auch der Schaumbeton sind vollständig carbonatisiert; mittels Phenolphthaleintest konnte kein Farbumschlag festgestellt werden.

Im Normalbeton ist unter den in Tabelle 1 aufgeführten Auslagerungsbedingungen bisher nur geringfügige flächige Zinkkorrosion bis zu der Betondeckung von 50 mm vorhanden. Bei 80 mm war keine Korrosion feststellbar.

Bei den Proben im Konstruktionsleichtbeton mit normaler Alkalität und ehemals erhöhter Chloridzugabe wurde die Zinkschicht in der ersten Bewehrungslage vollständig abgetragen. Bei höherer Betondeckung wurde neben vereinzelter, punktueller Stahlkorrosion ebenfalls flächige Zinkkorrosion festgestellt.

Beim haufwerksporigen Beton mit erhöhter Alkalität und ursprünglicher Chloridzugabe ist flächige Zinkkorrosion vorhanden. Daneben weist die Zinkauflage eine Vielzahl von Rissen auf.

Die Proben aus dem künstlich vorcarbonatisierten haufwerksporigen Beton zeigen ebenfalls (mit einer punktuellen Ausnahme) flächige Zinkkorrosion mit geringem Abtrag.

Beim Schaumbeton findet sich Stahlkorrosion unter den aufgeführten Auslagerungsbedingungen nur in der ersten Bewehrungslage von 15 mm. Ab 25 mm Betondeckung und darüber hinaus konnte bisher nur flächige Zinkkorrosion festgestellt werden.

## **6. Zusammenfassende Beurteilung nach 1, 2½ und 4 Jahren**

In der vorliegenden Arbeit wurden mit unverzinkten und feuerverzinkten Betonstählen bewehrte Normal- und Leichtbetonkörper (gefügedicht und nicht gefügedicht) mit Betondeckung von 1,5 - 2,5 - 5,0 und 8,0 cm unter folgenden Bedingungen ausgelagert:

Im Freien unter Dach,  
im Freien,  
in einem Klimaraum mit 100 % relativer Feuchte,  
im Freien mit Chloridbeaufschlagung.

Nach 1 2½ und 4 Jahren wurden die Stähle hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens untersucht. Zusätzlich wurden auch die notwendigen physikalischen und chemischen Betonparameter wie z.B. Porosität, Wasserhaushalt, Karbonatisierung und Chlorideindringung zwecks Erklärung bzw. Bewertung der Korrosion ermittelt.

Die Versuchsergebnisse brachten in bezug auf Wasseraufnahmefähigkeit, Karbonatisierungstiefe, Stahlkorrosionshäufigkeit und -intensität für Leichtbeton ungünstigere Ergebnisse als für Normalbeton. Dies gilt besonders für nicht gefügedichtete Leichtbetone (haufwerksporiger Beton und Porenbeton), trifft aber auch (in geringerem Maße) für gefügedichteten Konstruktionsleichtbeton zu.

Es wurde festgestellt, daß nicht gefügedichtete Leichtbetone aufgrund ihrer großen Gesamtporosität ein hohes Aufnahmevermögen für gasförmige und in Wasser gelöste Stoffe besitzen, aber die porositätsabhängigen Chloridgehalte nahe der Betonoberfläche durch Niederschläge ausgewaschen werden können.

Die Schädigung durch Stahlkorrosion in Beton nimmt in der Reihenfolge Normalbeton - Konstruktionsleichtbeton - luftgehärteter Porenbeton

(Schaumbeton) - haufwerksporiger Beton - dampfgehärteter Porenbeton (Gasbeton) zu. Deshalb ist es notwendig, die Bewehrung in nicht gefügedichtem Leichtbeton in besonderer Weise vor Korrosion zu schützen. Im Fall von

Konstruktionsleichtbeton wurde erkannt, daß, ähnlich den Verhältnissen in Normalbeton vergleichbarer Güte für den normalen Anwendungsfall, ein ausreichender Korrosionsschutz gegeben ist. Falls ein Chloridangriff stattfindet, sollte jedoch der Stahl geschützt werden.

Solange kein Chloridangriff stattfindet, ist durch eine Feuerverzinkung ein dauerhafter Korrosionsschutz gegeben. Dies trifft, mit Ausnahme des Gasbetons, für alle gefügedichteten oder nicht gefügedichteten Betone zu. Die deutlichsten Verbesserungen waren beim haufwerksporigen Beton zu sehen.

In hoch chloridhaltigem Beton erwies sich die Feuerverzinkung als eine nur zeitliche begrenzte Korrosionsschutzmaßnahme. Besonders ausgeprägt war der Zinkabtrag allerdings in nicht gefügedichteten Leichtbetonen. Dieses Verhalten ist auf den gleichzeitigen Einfluß von der abgeminderten Alkalität und dem geringen Diffusionswiderstand für Chloride bei diesen Sorten zurückzuführen.

In Gasbeton wurde unabhängig von den Auslagerungsbedingungen und der Betondeckung eine starke Zinkkorrosion festgestellt. Die Zinkauflage weist eine Vielzahl von Rissen auf, die durch die Wasserstoffentwicklung bei der Betonherstellung (Autoklavenbehandlung) bedingt sind.

In alkalireichem Beton (charakteristisch für eine Verwendung besonders alkalischer Zemente) wurde die Zinkkorrosion in den gefügedichteten und nicht gefügedichteten Leichtbetonen merklich beschleunigt.

## 7. Zusammenfassende Beurteilung nach 10 Jahren

Bei der Bewertung der Restzinkschichtdicken, bzw. des Zinkabtrages wird im folgenden von für die Proben ermittelten Schichtdicke von 145 µm ausgegangen. Die Ergebnisse weisen zumindest in einem Fall darauf hin, daß stellenweise höhere Ausgangswerte vorlagen, die verfahrensbedingt (die Stäbe wurden senkrecht in das Zinkbad getaucht) sind und lediglich die Endstücke der Probestäbe betreffen dürften.

Die mittleren Abtragswerte für verzinkte Bewehrung liegen nach 10 Jahren zwischen 19 und 55 µm mit Ausnahme von ehemals chloridbeaufschlagtem Konstruktionsleichtbeton bei geringer Überdeckung (1,5 cm). Dieser Extremfall, bei dem bereits die gesamte Zinkschicht verbraucht und der Stahl deutlich abgetragen war, fiel außerdem durch einen breiten Riß (0,5 mm) entlang des Probestabes auf. Alle anderen nach 10 Jahren untersuchten Versuchskörper zeigen

noch keine sichtbaren Schäden wie Abplatzungen oder Risse.

Ein grober Vergleich der nach 2½ und 10 Jahren festgestellten Abtragswerte ergibt (unabhängig von den veränderten Auslagerungsbedingungen) z.B. für eine Überdeckung von 1,5 cm nach 10 Jahren etwa das Doppelte des nach 2,5 Jahren festgestellten Abtrages, d.h. eine Halbierung der mittleren Abtragsrate. Die Unterschiede im Abtrag nach Art des Betons haben sich im Vergleich zu den 2,5-jahres-Ergebnissen ebenfalls deutlich angeglichen, sind also weniger deutlich als bei früheren Entnahmen.

Der höchste mittlere Abtrag der Verzinkung (55 und 52 µm) ist eindeutig den zu Beginn des Versuchszeitraumes (2,5 Jahre) chloridbeaufschlagten Versuchskörpern zuzuordnen. Ein Einfluß der Überdeckung verliert sich offensicht-

lich nach längerer Auslagerung. Bei geringen Überdeckungen finden sich jedoch in den nicht gefügedichten Betonen lokal ("punktförmig") Bereiche mit Stahlabtrag in weitgehend unverzinkter Verzinkung. In diesen Fällen ist demnach eine kathodische Schutzwirkung nicht in ausreichendem Maße gegeben.

Der Verbund Bewehrung/Beton ist nach zehn Jahren aufgrund der Beobachtungen beider Entnahme der Proben in Schaumbeton und carbonatisiertem Haufwerksporigem Beton sehr viel besser als in den anderen Fällen, was sich aus der unterschiedlichen (pH-abhängigen) Natur der Zinkkorrosionsprodukte erklären läßt.

Aufgrund der Ergebnisse ist davon auszugehen, daß eine Feuerverzinkung bei nicht zu geringer Betondeckung und nicht übermäßiger Chloridbeaufschlagung bei den hier untersuchten Beto-

nen einen über Jahrzehnte wirksamen Korrosionsschutz darstellt.

Hinsichtlich der Schutzwirkung von Zinküberzügen ergeben sich die in Abb. 8 dargestellten Verhältnisse. In den schraffierten Bereichen sollte auf eine Feuerverzinkung verzichtet werden.

Eine Feuerverzinkung kann jedoch als zusätzlicher Korrosionsschutz bei Bauteilen im freien und in dauerfeuchter Umgebung angewendet werden. Hier kann, mit Ausnahme des Sonderfalls Gasbeton, bei allen anderen gefügedichten oder nicht gefügedichten Betonen i.a. von einer guten Schutzwirkung ausgegangen werden. In chloridhaltigem Beton ist feuerverzinkter Betonstahl nicht zu empfehlen.

#### Literatur

- [1] Nürnberg, U., Mansour, T., Beul, W. Onuseit, G.  
Korrosionsverhalten feuerverzinkter Bewehrung in Leichtbeton
  
- [2] Mansour, T, (Dissertation)  
Möglichkeiten des Korrosionsschutzes von Bewehrungsstahl in Leichtbeton
  
- [3] Beul, W., Menzel, K.  
Langzeitverhalten von feuerverzinktem Betonstahl in Leichtbeton  
(Untersuchungsbericht des FMPA Stuttgart)

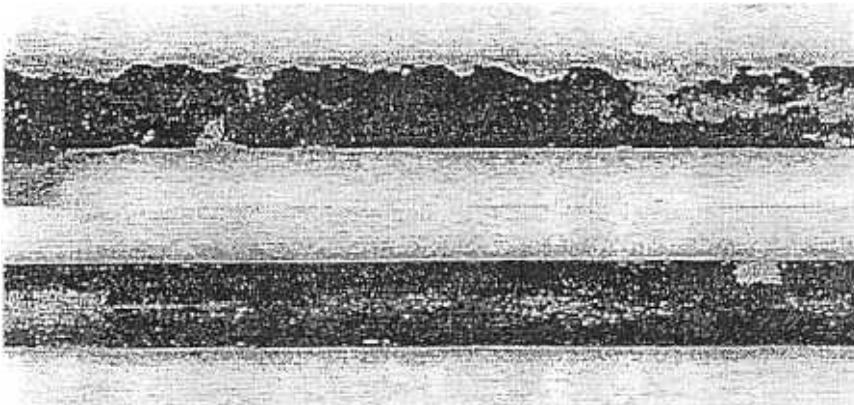


Abb. 4: Probe 15, Normalbeton,  $c = 15$  mm, Oberseite  
oben: Probe nach Ausbau; unten: Probe gereinigt  
(nach 10 Jahren)

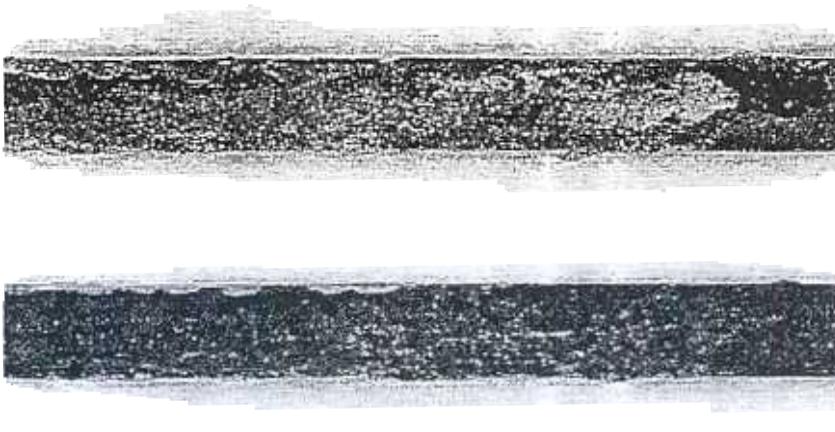


Abb. 5 Probe 67, Konstruktionsleichtbeton,  $c = 25$  mm, Oberseite  
oben: Probe nach Ausbau; unten: Probe gereinigt  
(nach 10 Jahren)

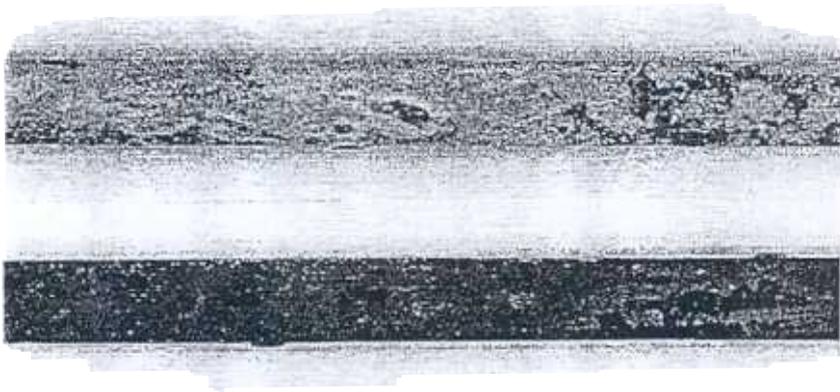


Abb. 6: Probe 73, Haufwerksporiger Beton,  $c = 15$  mm, Oberseite  
oben: Probe nach Ausbau; unten: Probe gereinigt  
(nach 10 Jahren)

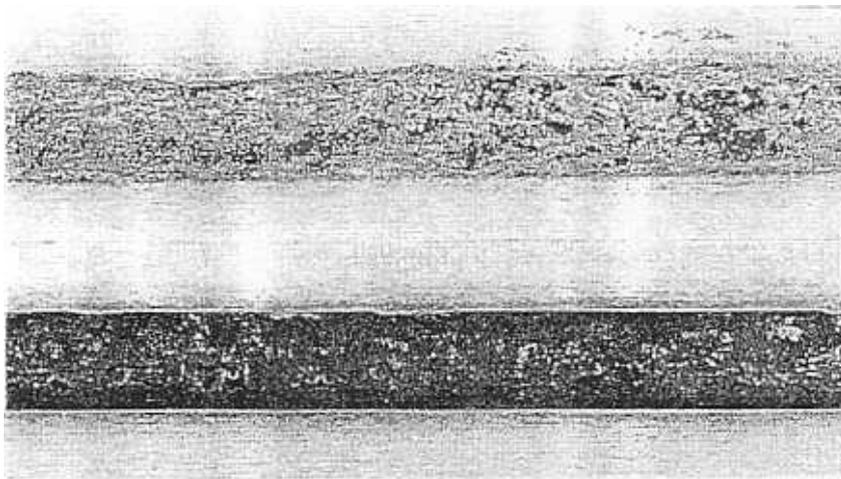


Abb. 7: Probe 80, Schaumbeton,  $c = 15$  mm, Oberseite  
oben: Probe nach Ausbau; unten Probe gereinigt  
(nach 10 Jahren)

Tabelle1: Zusammenstellung der ausgewählten Proben und gemessene Zinkschichtdicken

Betonart	Probe	Alkalität (1)	Auslagerung		Betondeckung in mm	Zinkschichtdicke (Mittelwert) in µm			Bemerkungen
			ursprünglich '89 - '92 (2)	seit '92		LS, Oberseite (3)	LS, Unterseite (3)	QS (4)	
Normalbeton B 25	15	normal	Fe	Fe	15	125	125	133	-
					25	136	143	134	-
					50	115	115	111	-
					80	154	141	(160)	-
Konstruktions- leichtbeton LB 25	67	normal	Cl 2	F	15	-	-	-	bereits Stahlabtrag
					25	135	(0 bis) 89	(0 bis) 129	punktueller Stahlkorrosion
					50	117	115	115	-
					80	134	128	115	-
Haufwerks- poriger Beton LB 8	73	hoch	Cl 1	F	15	97	(0 bis) 93	(0 bis) 83	punktueller Stahlkorrosion
					25	63	(0 bis) 62	(0 bis) 66	punktueller Stahlkorrosion
					50	101	98	98	-
					80	138	129	124	-
Haufwerks- poriger Beton LB 8	74	carbonatisiert	F	Fe	15	103	91	115	-
					25	(0 bis) 93	114	127	-
					50	97	101	106	-
					80	135	120	140	-
Schaumbeton	80	carbonatisiert	F	Fe	15	(0 bis) 114	128	(0 bis) 114	punktueller Stahlkorrosion
					25	120	113	115	-
					50	128	139	141	-
					80	137	141	120	-

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	1	1	1	1
KLB	1	1	1	1
HpB	1-2	1	1	1
GB	3-4	3	3	3

Bei 100% rel. Feuchte

Zinkabtrag	Mittl. Abtrag in $\mu\text{m}$	Mittl. Abtrag in %
1	< 10	< 7
2	10-25	7-17
3	25-40	17-28
4	40-70	28-48
5	> 70	> 48

Bezogen auf 145 $\mu\text{m}$  Zinkschicht

Abb. 3:  
Korrosionsgrad und Zinkabtrag von Feuerverzinktem Stahl in Beton nach 2,5 Jahren

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HoB				

Im Freien unter Dach

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				

Bei 100% rel. Feuchte

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HpB				
GB				
SB				

Im Freien ungeschützt

Einsatz zu empfehlen 

Einsatz nicht zu empfehlen 

Abb. 8:  
Einsatzgebiete für feuerverzinkten Betonstahl

Abb. 1: Übersicht der gebräuchlichsten Leichtbetone

Bezeichnung	Funktion	Anwendung	Bewehrung	Gefüge	Zuschlagart (DIN 4226)	Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	Festigkeitsklasse	Wärmeleitzahl W/m·K
Konstruktionsleichtbeton DIN 4219	konstruktiv, wärmedämmend	Betonhochbau, Sichtbeton	unbewehrt, bewehrt	geschlossen mit meist porigen Zuschlägen	Naturbims, Lava Blähton	0,8 - 1,3	LB8 - LB15	0,3 - 0,6
	vorwiegend konstruktiv	Ingenieurbau, Spannbeton	bewehrt		Blähton, -schiefer, Sinterbims, Hüttenbims	1,3 - 1,8 (2,0)	LB15 - LB45 (- LB55)	0,6 - 1,0 (1,2)
Haufwerksporiger Beton	wärmedämmend, in geringem Umfang statisch tragend	Wände, Stahlbetonhohldielen, Hohlblocksteine (Vollsteine)	Bewehrung möglich	offen mit meist porigen Zuschlägen	wie bei Konstruktionsleichtbeton	0,6 - 1,2 <sup>1)</sup>	LB2 - LB10 (- LB15)	0,2 - 0,5
Gasbeton, Schaumbeton (Porenbeton) DIN 4164	wärmedämmend, in geringem Umfang statisch tragend	Blocksteine, Bauplatten, Wände, Sohlen	unbewehrt bewehrt	porig	Quarzsand Blähton (z. T. Zusatzstoffe) GB: Blähmittel SB: Schaumbilder	GB: (SB) <sup>2)</sup> 0,4 - 0,85 SB: <sup>3)</sup> 0,4 - 1,6	G2 - G6 (1-15 N/mm <sup>2</sup> )	0,1 - 0,25

<sup>1)</sup> bei Verwendung dichter Zuschläge bis 2,0    <sup>2)</sup> dampfgehärtet    <sup>3)</sup> luftgehärtet

Normalbeton DIN 1045	konstruktiv	Betonbau	unbewehrt	geschlossen mit dichten Zuschlägen	Kies, Sand (Sandstein, Quarzit, Kalkstein, Granit)	2,1 - 2,4	B5 - B55	0,7 (Kalkstein) - 6,6 (Quarz)
		Stahlbetonbau Spannbetonbau	bewehrt				B15 - B55	



Abb. 2: Lagerung der proben im Freien mit Chloridbeaufschlagung