

Theorie und praktische Übungen zu Verarbeitungs-, Abbinde- und Erhärtungseigenschaften



Betonherstellung



Betonzusatzstoffe

Mineralische Feinstoffe

- Inerte Feinstoffe
- Puzzolanische Stoffe
- Steinkohlenflugasche
- Tuff, Trass
- Silica-Staub

Organische Stoffe

- Kunstharzdispersion
- Farbpigmente
- Fasern

Betonzusatzmitteln

- Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM)
- Luftporenbildner (LP)
- Erstarrungsbeschleuniger (BE) und Erhärtungsbeschleuniger (BE)
- Verzögerer (VZ)

■ Wichtige Grundbegriffe

Wasserzementwert (auch w/z-Wert)

bezeichnet das gewichtsbezogene Verhältnis aus Wasser zu Zement bei der Herstellung von Beton.

Da bei der Hydratation (dem reaktiven Erhärten) des Betons nur ein Teil des zugegebenen Wassers chemisch in den Zementstein eingebunden wird, verbleibt ein Teil des Wassers in flüssiger Form im Beton. Das **rechnerische Verhältnis aus Wasser und Zement**, das für eine vollständige Hydratation notwendig ist, liegt zwischen **0,45 - 0,55**. Sowohl das überschüssige Wasser als auch die **nach eventuellem Austrocknen verbleibenden Poren** stellen hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften und der Dauerhaftigkeit des Betons Schwachstellen dar. Ein erhöhter oder verringerter Wasserzementwert kann gezielt zur Einstellung bestimmter Festigkeitseigenschaften ("Walz"-Kurven) bzw. zur Einstellung eines bestimmten Porenanteils eingesetzt werden.

Nachteile bei zu hohem Wasserzementwert

Durch einen zu hohen Wasserzementwert kann der Beton seine Endfestigkeit nicht erreichen.

Des weiteren entstehen folgende Nachteile:

Die **Kapillarität des Festbetons nimmt zu**, d. h. der Beton nimmt mehr Wasser auf als normal

Das **Bluten des Frischbetons nimmt zu**; unter Bluten versteht man, dass sich Wasser an der Oberfläche absetzt und sich Zementteilchen absetzen

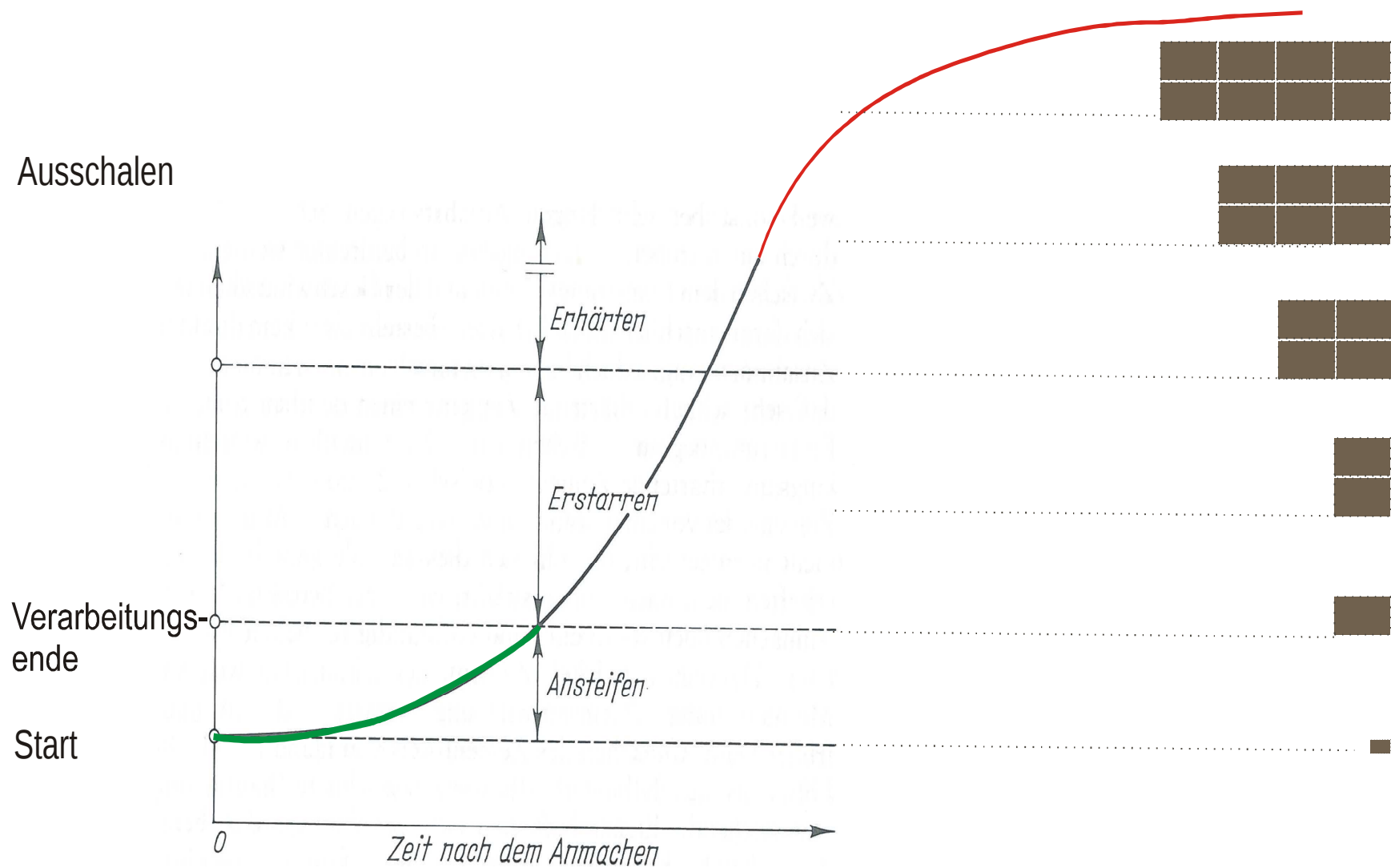
Das **Schwinden des Betons nimmt zu**; unter Schwinden versteht man, dass die Volumenverringering des Betons während der Erhärtung zunimmt

Die **Frostbeständigkeit nimmt ab**

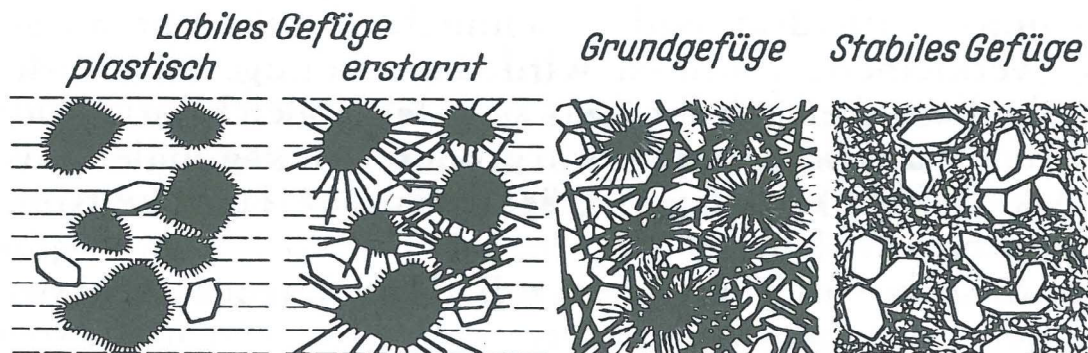
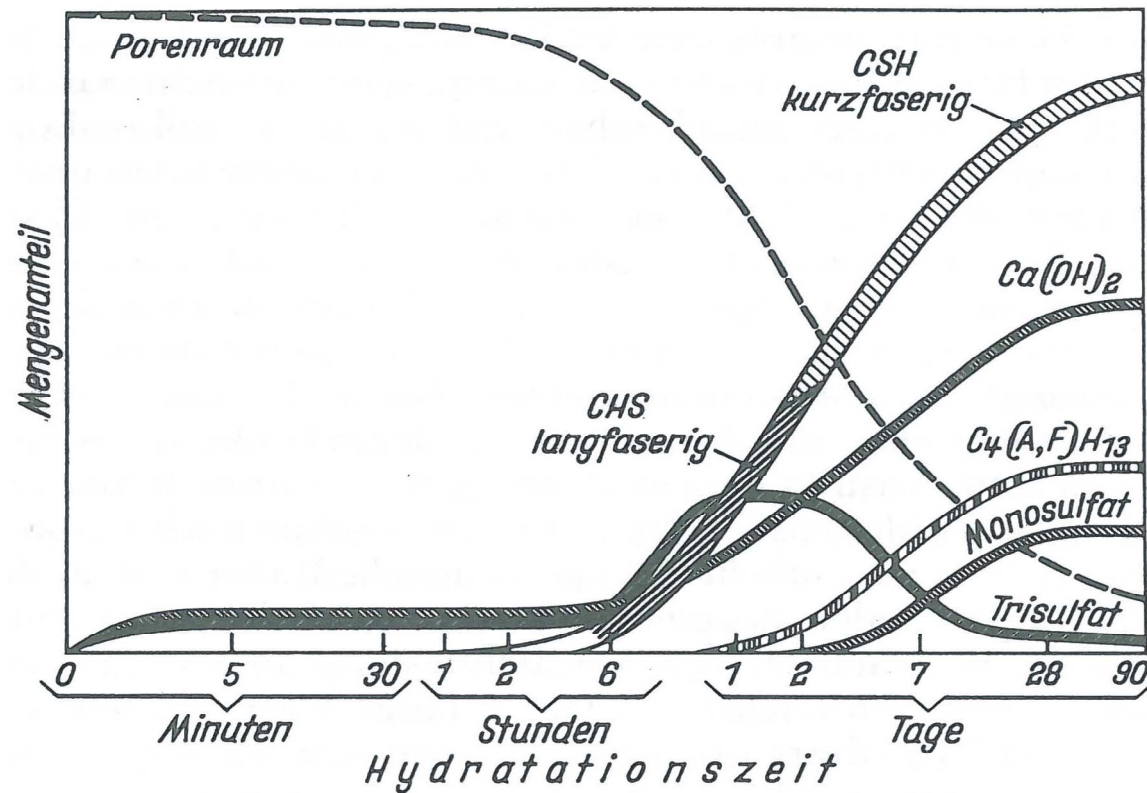
Der **Korrosionsschutz der Bewehrung** nimmt ab

HEIDELBERGCEMENT

Festigkeitsentwicklung



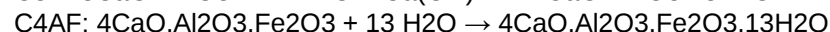
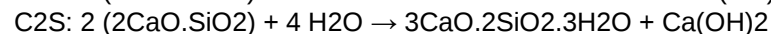
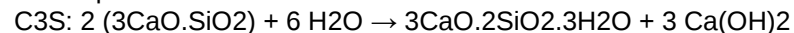
Hydratationsphasen



Hydratation und Festigkeitsentwicklung

Das Erstarren und Erhärten des Zements beruht auf der Bildung wasserhaltiger Verbindungen, die bei der Reaktion zwischen den Zementbestandteilen und dem Anmachwasser entstehen. Im Allgemeinen reagiert der Zement in einem verhältnismäßig wasserarmen, plastischen Gemisch mit Wasserzementwerten zwischen etwa 0,3 und 0,6. Die Reaktion wird als Hydratation, die Reaktionsprodukte werden als Hydrate oder Hydratphasen bezeichnet. Eine Folge der unmittelbar einsetzenden Reaktionen ist ein [Ansteifen](#) des Zementleims, das anfangs noch sehr gering ist, sich aber mit der Zeit verstärkt. Erreicht das Ansteifen des Zementleims ein bestimmtes Maß, so spricht man vom Beginn des [Erstarrens](#). Die zeitlich anschließende weitere Verfestigung des Zementleims gilt als Erstarren, die danach fortschreitende Verfestigung wird [Erhärten](#) genannt. Ursache des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens ist die Bildung eines mehr oder weniger starren Gefüges aus Hydratationsprodukten, das den wassergefüllten Zwischenraum zwischen den Feststoffpartikeln des Zementleims, Mörtels oder Betons ausfüllt. Der zeitliche Verlauf, nicht jedoch die Art der Hydratationsprodukte, hängt daher in sehr starkem Maß von der Größe des Zwischenraums ab, d. h. vom Wasserzementwert. Die festigkeitsbildenden Hydratationsprodukte sind bei den silicatischen Zementen in erster Linie Calciumsilicathydrate und beim Tonerdezement Calciumaluminathydrate. Weitere Hydratationsprodukte sind Calciumhydroxid, Calciumferrithydrate, sulfathaltige Hydrate. Alle Zemente enthalten als wesentliche Bestandteile auch Aluminium- und Eisenoxide sowie Sulfate, daher bilden sich auch Calciumaluminathydrate, Calciumferrithydrate und sulfathaltige Verbindungen sowie auch komplexere Hydratationsprodukte. Der [pH-Wert](#) der Porenlösung nimmt vergleichsweise hohe Werte an und ist für die meisten Hydratationsreaktionen von besonderer Bedeutung.

Kurz nach dem Kontakt mit Wasser setzt eine kurze, intensive Hydratation ein (Prä-Induktionsperiode), Calciumsulfate gehen teilweise und Alkalisulfate nahezu vollständig in Lösung. Aus der Reaktion von Calcium- und Sulfationen mit Tricalciumaluminat bilden sich auf den Oberflächen der Klinkerpartikel kurze, hexagonal säulenförmige [Ettringitkristalle](#). Daneben kommt es, ausgehend vom Tricalciumsilicat, zur Bildung von ersten Calciumsilicathydraten (CSH) in kolloidaler Form. Durch die Bildung einer dünnen Lage von Hydratationsprodukten auf den Klinkerpartikeln verebbt diese erste Hydratationsperiode, und die Ruheperiode oder Induktionsperiode, während der praktisch keine weitere Hydratation stattfindet, beginnt. Die ersten Hydratationsprodukte sind noch zu klein, um den Raum zwischen den Zementpartikeln zu überbrücken und ein festes Gefüge aufzubauen. Damit bleiben die Zementpartikel noch gegeneinander beweglich, das bedeutet die Konsistenz des Zementleims ist nur wenig steifer geworden. Das Erstarren des Zementleims beginnt nach etwa ein bis drei Stunden, wenn sich erste, noch sehr feine Calciumsilicathydratkristalle auf den Klinkerpartikeln bilden. Nach Abschluss der Ruheperiode setzt erneut eine intensive Hydratation der Klinkerphasen ein. Diese dritte Periode (Beschleunigungsperiode) beginnt nach etwa vier Stunden und endet nach 12 bis 24 Stunden. Dabei baut sich ein Grundgefüge auf, bestehend aus CSH-Faserbüscheln bzw. CSH-Blattstrukturen, plattigem Calciumhydroxid und in die Länge wachsenden [Ettringitkristallen](#). Durch die größeren Kristalle werden die Räume zwischen den Zementpartikeln überbrückt. Im weiteren Hydratationsverlauf nimmt die Verfestigung stetig zu, jedoch mit reduzierter Hydratationsrate. Das Gefüge verdichtet sich dabei und die Poren werden zunehmend ausgefüllt. Die chemischen Reaktionen der Klinkerphasen mit dem Anmachwasser lassen sich vereinfacht wie folgt darstellen:



Die Hydratationsprodukte bilden sich nicht gleichzeitig, sondern entsprechend ihrer Reaktionsfähigkeit mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und nach unterschiedlicher Dauer. Der Übergang von Erstarren zum Erhärten erfolgt „fließend“.