

1 Einleitung und Ziel der Arbeit

Hochleistungsbeton („*High-performance concrete*“ (HPC)) wird in erster Linie durch höhere Festigkeiten (ab 65 N/mm^2 bis 200 N/mm^2) und besondere Dauerhaftigkeitseigenschaften wie z.B. verbesserter Frostbeständigkeit, Widerstand gegenüber chemischem Angriff und geringerer Permeabilität charakterisiert. Diese besonderen Eigenschaften werden neben der Verringerung des Wasser-Bindemittel-Wertes (w/b-Wert) durch Zusatzstoffe wie Flugasche und Silikastaub erzielt. Durch die Entwicklung spezieller Fließmittel, so genannter Superverflüssiger („*superplasticizer*“), ist es darüber hinaus erst in den letzten Jahren möglich geworden, solche Betone mit einer verarbeitbaren Konsistenz herzustellen und sicher einzubauen. Durch die sich aus den besonderen Eigenschaften ergebenden Vorteile und der Möglichkeit schlankere Konstruktionen oder Brücken größerer Spannweiten herzustellen, kommt Hochleistungsbeton auch in Deutschland seit einigen Jahren vermehrt dort zum Einsatz, wo spezielle Ansprüche an ein Bauwerk gestellt werden.

Die Anwendung von Hochleistungsbeton ist aber immer noch mit einem gewissen Risiko und höheren Kosten verbunden. Die Verbesserung der Betoneigenschaften ist nur durch geeignete Materialkombinationen realisierbar. Aufgrund der Vielzahl einzusetzender Stoffe ist der Entwurf einer für den Anwendungsfall geeigneten Betonmischung schwieriger, verglichen mit herkömmlichem Beton. Wie sich bereits in der Praxis gezeigt hat, neigt Hochleistungsbeton in Abhängigkeit seiner Zusammensetzung zu unerwartetem Schadensverhalten und bereitet häufig Probleme bei der Herstellung und Gewährleistung einer einheitlichen Qualität. Dementsprechend ist bei Zugabe von Zusatzstoffen eine gleichmäßige Verteilung der Partikel in der Betonmatrix oder intakte Ausbildung der Kontaktzone auch bei sorgfältiger Herstellung nicht immer gegeben. Hochfeste Betone reagieren generell sensibler auf Schwankungen der Materialqualität und der Zusammensetzung. Gründe für dieses Verhalten sind vor allem Wechselwirkungen zwischen den Ausgangsstoffen, die zur Beeinflussung des Hydratationsverlaufes, der Mikro- und Nanostruktur sowie Porenverteilung und damit der Dauerhaftigkeit führen. Je nach chemischer Zusammensetzung erweisen sich somit nicht alle Materialkompositionen als kompatibel, was zum einen intensive Voruntersuchungen notwendig macht, zum anderen gesonderte Eignungsprüfungen des Betons auf der Baustelle erfordert. Dies macht neben den reinen Materialkosten, die preislich über denen von Normalbeton liegen, die Herstellung und Anwendung von Hochleistungsbeton deutlich teurer.

Aufgrund bisheriger Erfahrungen ist der Einsatz von Hochleistungsbeton daher immer noch für höhere Festigkeiten ab C90/105 nur nach Zulassung im Einzelfall möglich. Ein Qualitätssicherungsplan sowie ständige Überwachung sind ab einer Festigkeit von C55/67 vorgeschrieben. Eine standardisierte Anwendung wird zwar von der Industrie angestrebt, ist aber noch nicht in Aussicht, da die oben erwähnten Materialwechselwirkungen oder Einflüsse verschiedener Komponenten auf die Materialeigenschaften bisher nur unzureichend beschrieben und analysiert worden sind. In den meisten Fällen werden die Probleme, die sich bei der Herstellung und Anwendung von Hoch-

leistungsbeton ergeben, auf andere Faktoren zurückgeführt. Dies liegt vor allem daran, dass bisher nur wenige Daten vorliegen, die zeigen, welche Einflussparameter die Dauerhaftigkeit von Hochleistungsbeton beeinflussen bzw. Aussagen zur Lebensdauer vorhersagen liefern könnten. Für die Gewährleistung dauerhafter hochfester Bauwerke ist die Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz widerstandes ein wichtiger Aspekt.

Grundsätzlich lässt sich ein Frostschaden bei Anwesenheit von Tausalzen durch Abwittern von Partikeln, i.d.R. Mörtel oder kleinere Zuschlagkörner, an der Oberfläche charakterisieren. Dazu kommt in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Betons oft auch eine innere Schädigung des Betongefüges, die beim reinen Frostangriff überwiegt. Die Festigkeit des Materials wird dadurch ganz erheblich beeinträchtigt und kann schließlich zum völligen Versagen des Bauteils führen. Hier ist es unerlässlich, mit geeigneten Prüfmethode eine beginnende Schädigung frühzeitig festzustellen und entsprechende Maßnahmen wie z.B. der Aufbringung von Oberflächenschutzsystemen zu ergreifen. Im Labor kann der Frostwiderstand einer Betonmischung mit so genannten Frost-Tau-Wechsel Prüfungen durchgeführt werden. Reproduzierbare Ergebnisse lassen sich mittels des CDF/ CIF-Testes erzielen, mit dem praxisnah ein Angriff simuliert und die innere sowie äußere Schädigung eindeutig bestimmt werden kann. Der zu prüfende Beton wird dabei durch die Frost-Tau-Wechsel, gemäß dem Model von SETZER künstlich gesättigt. Nach Erreichen der kritischen Sättigung genügen wenige Frost-Tau-Wechsel, um den Beton vollständig zu zerstören.

In der Literatur sind bislang recht widersprüchliche Aussagen zum Verhalten von Hochleistungsbeton gegenüber Frost- und Frost-Tausalzeinwirkung zu finden. Daten über die Abschätzung der Lebensdauer von Hochleistungsbeton gibt es derzeit noch nicht. Dabei bleibt generell die Frage offen, ob für Hochleistungsbeton spezielle Anforderungen an den Frostwiderstand gelten sollten. Die Normung sieht derzeit für Hochleistungsbeton keine Einschränkung hinsichtlich der Zusammensetzung vor, wenn dieser Frost- oder Frost-Tausalzbelastung ausgesetzt ist. Eine Regelung der maximalen Zugabemenge von Zusatzstoffen wie Silikastaub oder Flugasche ist allgemein für Beton in der DIN 1045 festgelegt worden, die sich aber nur auf den Korrosionsschutz von bewehrten Bauteilen bezieht. Nach DIN 1045 gilt Hochleistungsbeton als frostbeständig, wenn geeignete Zuschläge (eF nach DIN 4226) verwendet werden. Flugasche darf bei frostbelasteten Bauteilen dem w/b-Wert nicht angerechnet werden. Der Einsatz von Luftporenbildnern wird nicht zwingend vorgeschrieben.

Da Hochleistungsbetone grundsätzlich betrachtet ein verändertes Materialverhalten im Vergleich zu Normalbeton aufweisen, was nicht nur für die charakteristischen Kenngrößen gilt, unterscheidet sich auch das Frostverhalten. Hauptursache hierfür ist die deutlich dichtere und sprödere Matrix. Silikastaub, Flugasche oder Zusatzmittel wie Fließmittel oder Verflüssiger, die zur Herstellung von Hochleistungsbetonen eingesetzt werden, beeinflussen die Betonstruktur ganz erheblich. Aufgrund der vielfältigen Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Zusammensetzung von Hochleistungsbeton variiert auch die innere wie äußere Schädigung unter Frostbeanspruchung ganz entscheidend.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ausgehend von den Erkenntnissen, die derzeit über die Frostschädigung von Normalbeton existieren, das Schadensverhalten von Hochleistungsbeton in Abhängigkeit seines Designkonzeptes und der Porenstruktur systematisch untersucht werden. Es soll die Frage geklärt werden, inwieweit eine Modellierung der Porenstruktur über die Dosierung von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen zu einer gezielten Beeinflussung der Frostbeständigkeit führen kann, und ob es Einschränkungen hinsichtlich der Zusammensetzung bei frostbelasteten Bauteilen aus Hochleistungsbeton gibt. In dieser Arbeit wurde daher ein breites Spektrum an unterschiedlichen Hochleistungsbetonen auf ihre Frostbeständigkeit geprüft und die innere Schädigung sowie Feuchteaufnahme gemessen. Eine Beschreibung dieser Parameter ermöglichte es, konkretere Aussagen zum Schadenszeitpunkt sowie der Lebensdauer von Hochleistungsbeton in Abhängigkeit der Zusammensetzung zu treffen. Anomalien im Schadensverhaltens konnten nach eingehender Analyse mehr Aufschluss über die Schadensmechanismen bei Hochleistungsbeton geben.

Zusammengefasst ergab sich also aus den oben genannten Punkten die folgende Fragestellung, die zur Motivation dieser Arbeit führte:

1. Inwieweit unterscheidet sich das Schadensverhalten infolge Frost-Tau-Wechsel-Belastung von Hochleistungsbeton im Vergleich zu Normalbeton bzw. sind die Schadensmechanismen, die für Normalbeton gelten, übertragbar auf hochfeste Betone?
2. Inwiefern beeinflussen Zusatzstoffe und Zusatzmittel den Schadensverlauf, insbesondere im Hinblick auf die Feuchteaufnahme und innere Schädigung? Sind Einschränkungen hinsichtlich der Zusammensetzung sinnvoll?
3. Welche Einflussfaktoren und Randbedingungen spielen bei Hochleistungsbeton eine Rolle im Hinblick auf die Frostbeständigkeit?
4. Gibt es in Abhängigkeit der Zusammensetzung ein einheitliches Bewertungsmerkmal?
5. Lässt sich über die Zusammensetzung bzw. die gezielte Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln der Frostwiderstand modifizieren, insbesondere unter Berücksichtigung der Porengrößenverteilung?

2 Grundlagen

2.1 Entwicklung von Hochleistungsbeton

Durch die enorme Entwicklung in der Betontechnologie innerhalb der letzten 35 Jahre ist es zu einer Vielzahl an neuen Produkten und elementaren Verbesserung der Eigenschaften herkömmlicher Betone gekommen. Zunächst nur in den 70 iger Jahren des letzten Jahrhunderts in Skandinavien beispielsweise für Ölplattformen eingesetzt, nahm die Anwendung der **hochfesten Betone** („*high-performance concrete*“) auch in anderen Ländern wie USA oder Japan rapide zu. Hier wurden die Vorteile dieses neuen Baustoffs besonders für Bürotürme mit schlankeren Stützenquerschnitten und geringeren Bewehrungsgehalten genutzt.

Während Normalbeton in der Regel grundsätzlich aus Wasser, Zement und Gesteinskörnung hergestellt werden kann, handelt es sich bei Hochleistungsbeton um ein Mehrstoff-System, bei dem neben den üblichen Betonkomponenten zusätzliche Bindemittel wie Silika oder Flugasche sowie Zusatzmittel wie Fließmittel oder Verflüssiger eingesetzt werden. Dies geschieht um zum einen höhere Festigkeiten zu erreichen, zum anderen aber um die Betonstruktur so dicht zu gestalten, dass das Eindringen von Flüssigkeiten oder Tausalzen erschwert wird, so dass ein hoher Widerstand gegen äußere Angriffe gegeben ist. Der Einsatz von Zusatzmitteln macht die Herstellung von Hochleistungsbeton erst möglich, da aufgrund der geringen Anmachwassermenge der Beton ansonsten kaum zu verarbeiten ist. Mit Hilfe neu entwickelter hochwirksamer Fließmittel kann der Anmachwassergehalt auf ein Minimum reduziert und ein dennoch gut zu verarbeitenden Beton erzielt werden. Durch diese Entwicklung ist es möglich, Betone mit Wasser-Bindemittel-Werten (w/b-Wert) von bis zu 0,18 herzustellen, die dann aber schon zu den ultrahochfesten Betonen (UHPC) zählen.

Eine präzise Definition für Hochleistungsbeton gibt es grundsätzlich nicht. Es handelt sich vielmehr um eine integrale Bezeichnung für eine Vielzahl an Betonen, die entsprechende Eigenschaften aufweisen. So lässt sich z.B. nach GRIMM [G6] Hochleistungsbeton wie folgt definieren: „Hochleistungsbeton ist ein Beton, hergestellt aus geeigneten Materialien, verbunden mit einer ausgewählten Rezeptur und wird entsprechend sorgfältig gemischt, transportiert, eingebracht, verdichtet und nachbehandelt. Der daraus resultierende Beton weist herausragende Eigenschaften im Bauteil auf, in der Umgebung, welcher er ausgesetzt ist und bei Belastungen, denen er während seiner konzipierten Lebensdauer unterworfen ist“.

Rückblickend betrachtet, wurden Betone mit hohen Druckfestigkeiten von über 100 N/mm² schon wesentlich früher als 1970 hergestellt. Jedoch erforderte dies einen so hohen technologischen Aufwand, dass eine Umsetzung in der Baupraxis nicht möglich war. Erst durch die Erfindung von Hochleistungsverflüssigern konnten hochfeste Betone bis 100 N/mm² hergestellt und verarbeitet werden. Mit dem Einsatz von Silika- und Flugasche als Zusatzstoff konnte ab 1980 auch die Herstellung von Betonen mit einer Druckfestigkeit über 100 N/mm² sichergestellt werden [R3], [R5], [S6].

In Deutschland wurde Hochleistungsbeton erst deutlich später angewendet, da das Fehlen von Regelwerken für hochfesten Beton eine breitere Anwendung lange Zeit verhinderte. Bis heute ist für Hochleistungsbeton und Festigkeiten ab C90/105 eine bauaufsichtliche Zulassung im Einzelfall notwendig. Allerdings wurde in den letzten Jahren dem Thema Hochleistungsbeton mehr Beachtung geschenkt, insbesondere im Zuge der Einführung der europäischen Normen. 1995 wurde als Ergänzung zur DIN 1045, die nur Betone bis Festigkeitsklasse B55 berücksichtigt, die Richtlinie für hochfesten Beton des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton veröffentlicht, die Regelungen für Betone der Festigkeitsklassen B65 bis B115 beinhaltet [1], [2]. Diese Regelungen erleichterten die Benutzung von Hochleistungsbeton im Stahlbetonbau. Während in der europäischen Norm EC 2 bzw. DIN 1045-1 bis 2001 nur Festigkeitsklassen für Beton bis C50/60 aufgeführt wurden, sind in der Betonnorm DIN EN 206-1 und deren deutschen Verwendungsregeln sowie neuester DIN 1045-1 bereits Betone bis C 100/115 berücksichtigt, wobei für die Festigkeitsklassen C 90/105 und C 100/115 aber eine allgemeine Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall sowie ein Qualitätssicherungsplan erforderlich wird [11]. Ab einer Festigkeit von C55/67 werden seit 2001 erhöhte Anforderungen an die Bauüberwachung gestellt. In der DIN 1045-1 bzw. DIN EN 206-1 wird Beton mit einer Festigkeitsklasse über C 60/75 bei Schwer- und Normalbeton und über LC 55/60 bei Leichtbeton als hochfester Beton bezeichnet. Die Definition der Festigkeitsklassen wird international sehr unterschiedlich gehandhabt.

Hochleistungsbeton fand bisher grundsätzlich überall dort Verwendung, wo besondere Anforderungen an Beton und seine Eigenschaften gestellt werden. Dies sind z.B. hochbeanspruchte Druckglieder im Hochhaus- und Brückenbau, Offshore-Bauwerke, Fertigteile oder aber Oberflächenschutz- und Instandsetzungs-Systeme. Neben Vorteilen wie verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften, geringeren Bewehrungsgehalten und schlankeren Bauteilabmessungen, sind aber auch verkürzte Verdichtungs- und damit Hehrstellungszeiten verbunden mit geringerem Personalaufwand beim Einsatz von Hochleistungsbeton zu nennen. Bei der Anwendung auf der Baustelle ist ein Qualitätssicherungsplan notwendig, der die Qualität des Betons durch die höheren Ansprüche an den Werkstoff gewährleisten soll, allerdings nicht alle Parameter mit einbezieht.

Mittlerweile ist es möglich, Betone mit Festigkeiten über 200 N/mm² herzustellen, die zu den **ultrahochfesten Betonen** („*ultra-high-performance concrete*“) gezählt werden. Um solche Druckfestigkeiten zu erreichen sind neben den Bestandteilen, die auch für Hochleistungsbetone verwendet werden, eine weitere Reduzierung des w/b-Wertes, fein abgestufte Sieblinien, Fasern sowie zusätzliche Maßnahmen wie Wärmebehandlungen notwendig. Insbesondere die Zugabe von Drahtfasern führt zu einer deutlichen Steigerung der Druck- und Biegezugfestigkeiten, da es zu einer Behinderung der inneren Rissausbreitung kommt, aufgrund dessen die Rissöffnung verzögert wird. Wichtig ist außerdem die Art der Nachbehandlung, da bei w/b-Werten unter 0,25 durch den langsamen Hydratationsverlauf die Austrocknung besonders groß ist [K11].

Betone, bei denen durch die enorme Fließfähigkeit ein Ausbreitmaß größer als 63 cm erreicht werden kann, werden als **selbstverdichtende Betone** („*self compacting concrete*“) bezeichnet. Bei solchen Betonen soll eine hohlraumarme Ausfüllung der Schalungen mit optimaler Umhüllung der Bewehrung und Entlüftung nur aufgrund des Eigengewichts des Betons erfolgen, ohne äußere manuelle Einwirkung. Wichtig dabei ist, dass der Beton nicht sedimentiert, er muss also ausreichend fließfähig sein und eine sehr hohe Gefügestabilität besitzen, so dass ein Entmischen verhindert wird. Aufgrund dessen ist hier die Kornabstufung der Einzelkomponenten sehr wichtig. Selbstverdichtender Beton muss bestimmte Anforderungen an das Setzfließmaß, die Fließzeit sowie das Blockierverhalten im Falle von Hindernissen erfüllen, um als solcher bezeichnet werden zu können. In der Literatur wird davon ausgegangen, dass seine Dauerhaftigkeitseigenschaften in etwa denen von Normalbeton entsprechen [D2], [L13].

2.2 Materialspezifische Grundlagen

Die nachfolgend aufgeführten Kapitel stellen kurz die Unterschiede zwischen der Verwendung der Ausgangsmaterialien bei Normal- und Hochleistungsbeton dar mit besonderem Augenmerk auf ihre Anwendung bei Frost- und Frost-Tausalzbelastung. Um die Unterschiede der Hydratation zwischen Normal- und Hochleistungsbeton betrachten zu können, wird in diesem Kapitel zuerst allgemein auf die Hydratation von Zement und Wasser bzw. die daraus entstehenden C-S-H-Phasen und ihre Klinkerphasenzusammensetzung eingegangen.

2.2.1 Gesteinskörnungen

Obwohl die Lastabtragung über das Korngerüst des Gesteinkorns erfolgt, beeinflusst bei **Normalbeton** die Gesteinskörnung die Betonfestigkeit i.d.R. nicht. Die Kornfestigkeit ist bei Normalbeton normalerweise deutlich höher als die Festigkeit des Zementsteins bzw. der Kontaktzone zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung. Bei porigen Gesteinen, die bei Leichtbeton oder bei hochfesten Betonen verwendet werden, kann die Festigkeit der Gesteinskörnung maßgebend werden (s. Kapitel 2.4.1) [M6]. Um eine möglichst hohlraumarme Sieblinie zu erhalten, muss das Verhältnis der Korngrößen zueinander so gewählt werden, dass die Hohlräume zwischen den Körnern einer Korngruppe gerade von den Körnern der nächst kleineren ausgefüllt werden. Dadurch lässt sich die größte Dichtigkeit, der geringste Zementleimbedarf und die höchste Festigkeit erreichen [8], [9], [K17].

Die Anforderungen an Gesteinskörnungen sind in DIN 4226 geregelt [8], [9]. Danach müssen diese ausreichend fest (Druckfestigkeit bei Gestein mit dichtem Gefüge > 100 N/mm²) und frost- bzw. witterungsbeständig sein, dürfen keine oder nur geringe mörtel- oder betonschädlichen Bestandteile enthalten und sollten eine günstige Kornform und Zusammensetzung besitzen. Zuschläge mit gedrungener Kornform ergeben höhere Betonfestigkeiten als längliche oder plattige Körner, insbesondere bezogen auf die Zugfestigkeit. Splittige und raue Gesteine erhöhen den Wasserbedarf aufgrund der schlechten Verdichtungswilligkeit und der größeren Oberfläche, ggf. ist bei diesen auch eine Erhöhung des Sandgehaltes zur Verdichtung notwendig. Allerdings

haften raue Kornoberflächen besser am Zementstein als glatte, was zu einer besseren Gefügeverzahnung und damit zu einer höheren Biegezugfestigkeit führt [K17].

Bei **Hochleistungsbeton** darf im allgemeinen außer Rest- bzw. Recyclinggesteinskörnungen jede Gesteinskörnung, die den gewünschten Anforderungen an das Bauteil entspricht, verwendet werden. Allerdings ist für eine optimale Verarbeitbarkeit auf eine optimierte Sieblinie zu achten, da sich der Einfluss der Sieblinie hier stärker auswirkt als bei Normalbeton. Insbesondere Mischungen mit sehr niedrigem w/b-Wert und Splitten sind extrem wasserarm und erfordern deshalb besondere Beachtung bei der Auswahl der Sieblinie. Silika, das eine zusätzliche Klebewirkung besitzt, erschwert die Verarbeitung der Mischung zusätzlich. Die Sieblinie nach FULLER, bei der rechnerisch die höchste Packungsdichte erreicht wird und die relativ sandarm ist, hat sich als geeignet erwiesen. Abgesehen davon ist ein Größtkorn von 16 mm nicht zu überschreiten, um Störstellen und Spannungsspitzen zu vermeiden [K17]. Grundsätzlich werden bei Hochleistungsbeton aufgrund der höheren Festigkeit und besseren Verzahnung bevorzugt Basaltsplitte eingesetzt. Bei niedrigeren Festigkeiten unter 100 N/mm² werden aufgrund der besseren Verarbeitungseigenschaften von Rundkörnern Quarzkiese verwendet. Da bei Hochleistungsbeton die Zementsteinmatrix i.d.R. eine höhere Festigkeit aufweist als die Gesteinskörnung und damit diese die Druckfestigkeit signifikant beeinflusst, ist die Auswahl des Gesteinskorns und der Sieblinie von besonderer Bedeutung.

Der **Frostwiderstand** der Gesteinskörnung hängt in erster Linie vom Hohlraumgehalt und dem Haftungsvermögen ab. Dabei spielen wie bereits erwähnt die Dichtigkeit der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskorn eine große Rolle, sowie die mineralogische Beschaffenheit und Festigkeit der Gesteinskörnung. Ebenfalls ausschlaggebend ist für die Frost- und Frost-Tausalzbeständigkeit des Gesteinskorns die thermische Längenänderung bei Befeuchtung und Trocknung, was bei großen Unterschieden zu inneren Spannungen führen kann. Besonders anfällig gegen Frostangriff sind Gesteine mit hohen Porositäten und feiner Porenstruktur [K1]. Weitere Klarheit über den Einfluss und die Messung der Frostständigkeit von Gesteinskörnungen bringt die Arbeit von HEINE [H8]. Es werden allgemein Schadensbilder wie das „*D-cracking*“ oder das Abplatzen dünner Mörtelschichten, so genannter „*pop-outs*“ unterschieden.

2.2.2 Zement

Der Zementklinker besteht hauptsächlich aus chemischen Verbindungen von CaO mit SiO₂, Al₂O₃ und Fe₂O₃ (s. Tabelle 1). Hierbei handelt es sich um idealisierte reine Klinkerphasen, die so im industriell hergestellten Zementklinker nicht oder nur teilweise vorliegen. Außerdem enthalten ist noch freies CaO, freies MgO, nicht kristallisierte Schmelze und Spurenelemente sowie i.d.R. Alkalisulfate wie Arcanit (K₂SO₄).

Die Festigkeitsbildung wird hauptsächlich durch die silikatischen Klinkerphasen C₃S, welche für eine hohe Anfangsfestigkeit verantwortlich sind, und C₂S, das die Endfestigkeit mit bestimmt, beeinflusst. Beim C₂S ist die Modifikation d.h. die genaue che-

mische Zusammensetzung für die Festigkeitsentwicklung entscheidend. C_3A und C_4AF besitzen dagegen nur geringe Endfestigkeiten.

Tabelle 1: Zusammensetzung des Zementklinkers [10].

Bezeichnung des reinen Minerals	Bezeichnung des im Klinker vorliegenden Minerals	Formel	Kurzzeichen	Anteile im Klinker [M.-%]	
				im Mittel	Extremwerte
Tricalciumsilicat	Alit	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	63	45-80
Dicalciumsilicat	Belit	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	16	0-32
Tricalciumaluminat	Aluminat	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	11	7-15
Calciumaluminatferrit	Aluminatferrit	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_2(A,F)$	8	4-14

Zur Vergrößerung der reaktionsfähigen Oberfläche wird der zunächst walnussgroße Klinker fein gemahlen. Dabei hängt die Reaktionsgeschwindigkeit bzw. der Festigkeitsanstieg während der Zementerhärtung von der Größe dieser Oberfläche ab. Daraus resultieren die drei Zementfestigkeitsklassen - 32,5, 42,5 und 52,5 - die aufgrund der 28-Tage-Druckfestigkeit des Normmörtels definiert werden. In Tabelle 2 sind Werte für die spezifische Oberfläche verschiedener Zementarten angegeben. Bei ständig ausreichendem Feuchteangebot erreichen Zemente unterschiedlicher Mahlfineinheiten jedoch annähernd gleiche Endfestigkeiten.

Tabelle 2: Anhaltswerte für die Mahlfineinheit bzw. die daraus resultierenden spez. Oberflächen von Zementen [S42].

Zementart	spezifische Oberfläche in cm^2/g
CEM I 32,5	2400 - 4000
CEM I 42,5	2800 - 4500
CEM I 52,5	4000 - 6000
CEM II /A-P	3000 - 5500
CEM III 32,5	3000 - 4000
CEM III 42,5	3300 - 4500

Der gemahlene Klinker reagiert sofort nach Wasserzugabe, so dass eine Verarbeitung wegen des schnellen Ansteifens nicht möglich ist [A2], [S42]. Um das Erstarren zu verzögern, wird dem Zement ein Sulfatträger, z.B. Gips und/ oder Anhydrit zugegeben. Dieser reagiert mit dem C_3A und bildet auf den C_3A -Körnern zunächst Trisulfat (Ettringit). Durch diese Hüllenbildung wird die schnelle Reaktion des C_3A verlangsamt. Ohne Zugabe eines Sulfatträgers bilden sich sofort nach Wasserzugabe tafelförmige Calciumaluminathydrate (C_4AH_{13}), die sofort erstarren. Die Anwendung von Zementen ist je nach Expositionsklasse in der DIN 1045 bzw. EN 206 geregelt [2], [11]. Für die Klasse XF werden derzeit keine Einschränkungen hinsichtlich der zu verwendenden Zementart erhoben. Sie müssen lediglich der DIN 1164 [7] entsprechen. Bei den Klassen XF2 und 4 ist eine Mindestfestigkeitsklasse von 32,5 bzw. 42,5 gefordert. Bei Exposition unter XF4 dürfen CEM III/B Zemente nur für Wasserbauwerke und Räumlerlaufbahnen eingesetzt werden.