

Auswirkungen der Wärmebehandlung auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton

Von Ulrich Neck, Düsseldorf*)

Übersicht

Außenbauteile aus Beton, die bei der Herstellung intensiv wärmebehandelt wurden, wiesen bei bestimmten Lagerungsbedingungen nach einigen Jahren größere Schäden in Form von Rissen, Gefügestörungen und einer Entfestigung auf, obwohl die Bauteile zum Zeitpunkt des Einbaus anscheinend in Ordnung waren und hohe Festigkeiten besaßen. Diese Spätschäden waren der Anlaß für umfangreiche chemisch-mineralogische und betontechnologische Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie.

Eine zu frühe und zu schnelle Aufheizung des Betons auf relativ hohe Temperaturen wirkt sich physikalisch und chemisch-mineralogisch sehr ungünstig aus. Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten entstehen dabei Gefügestörungen im jungen Beton, insbesondere wenn erdfeuchte Betonkörper ohne Form intensiv wärmebehandelt werden. Ferner wird dabei das zur Regelung des Erstarrens zugesetzte Sulfat nicht fest eingebunden, sondern nur an Hydratphasen angelagert, so daß es bei späterer feuchter Lagerung des Betons schädigende Phasenneubildungen im gestörten Gefüge des Betons hervorrufen kann. Während eine intensive Wärmebehandlung von Betonbauteilen für trockene Innenräume unbedenklich ist, läßt sich die Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen nur durch eine milde Wärmebehandlung mit einer ausreichend langen Vorlagerung erreichen.

1. Einleitung

Die Wärmebehandlung von Beton wird in der Praxis sehr häufig als Erhärtungsbeschleunigung genutzt. Besonders für den Ablauf einer seriellen Produktion gleichartiger Bauteile in einem Betonfertigteilwerk oder einer Feldfabrik, siehe Bild 1, hat die für die Erhärtung des Betons bis zu einer bestimmten Festigkeit erforderliche Zeitspanne eine erhebliche Bedeutung. Die jeweils bis zum Verlassen der meist kostspieligen Betriebseinrichtungen erforderliche Festigkeit des Betons hängt von den Beanspruchungen ab, denen das Bauteil im weiteren Betriebsablauf ausgesetzt wird. In Tafel 1 sind für drei wesentliche Behandlungszustände die im allgemeinen mindestens erforderlichen Betondruckfestigkeiten angegeben.

*) Nach einem Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zementtagung '88 des VDZ am 20./21. Januar 1988 in Düsseldorf



Bild 1 Serienfertigung von Betonfertigteilen in einer Feldfabrik Foto: Cürllis

Tafel 1 Erforderliche Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von verschiedenen Herstell- bzw. Betriebsbedingungen

Herstell-/Betriebsbedingungen	erforderliche Betondruckfestigkeit in N/mm ²
Entformen/Abstellen	> 10
Stapeln/Transportieren	> 20
Vorspannen bei B 45 bei B 55	≥ 40 ≥ 48

Neben den die Frühfestigkeit steigernden betontechnologischen Maßnahmen [1], wie z. B. die Wahl möglichst niedriger Wasserzementwerte oder die Verwendung von Zementen mit hoher Anfangsfestigkeit, zählt die gezielte Erhöhung der Lagerungstemperatur zu den besonders praktikablen Maßnahmen für eine Erhärtungsbeschleunigung; das gilt selbst zu Zeiten höherer Energiepreise. Die freiwerdende Wärmemenge bei der Hydratation des Zements, hohe Lufttemperaturen in Ländern mit warmem Klima [3], oder die vielfältigen Arten der künstlichen Aufheizung [4] werden — oft auch in Kombination — für die Wärmebehandlung genutzt. Die Auswahl der Wärmebehandlungsverfahren richtet sich im wesentlichen nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Der Ablauf eines Wärmebehandlungsprogramms läßt sich durch die Wahl von Vorlagerungstemperatur und -dauer, von Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit sowie von Höhe der Maximaltemperatur und

Dauer der Haltephase sehr unterschiedlich gestalten. Da dementsprechend die temperaturabhängigen Einflüsse auf den Beton verschieden sind, kommt es je nach Art und Ablauf der Wärmebehandlung auch zu unterschiedlichen Wirkungen im Beton und damit zu einer Beeinflussung seiner Eigenschaften. Dies gilt nicht nur für die Betoneigenschaften im frühen Alter, sondern — wie die Praxis gezeigt hat — auch für das Langzeitverhalten, d. h. für die Dauerhaftigkeit des Betons.

2. Langzeitschäden in der Praxis

Vereinzelt haben stark beanspruchte Betonbauteile aus hochfesten Betonen in der Praxis eine nicht ausreichende Dauerhaftigkeit gezeigt. Ein mit der Zeit zunehmendes Krakelee-Rißbild auf der Bauteiloberfläche, siehe Bild 2, war das äußere Zeichen einer im Innern des Betons eingetretenen Gefügestörung, die zum Festigkeitsverlust führte. Gemeinsames Merkmal von derart geschädigten Bauteilen war, daß sie intensiv wärmebehandelt und während der Nutzung oder Lagerung der freien Bewitterung ausgesetzt waren.

Röntgenografische und elektronenmikroskopische Gefügeuntersuchungen am geschädigten Beton ergaben, daß sich bevorzugt in



Bild 2 Krakelee-Rißbildung auf der Betonoberfläche am Kopf einer Spannbetonschwelle im Gleis

der Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlagoberfläche Sekundärphasen gebildet hatten. Dabei handelte es sich um Ettringit- oder Thaumazitkristalle oder um Mischkristalle beider Verbindungen [5], die im Beton nur unter bestimmten Voraussetzungen nachträglich entstehen können und sich deshalb und aufgrund der gewachsenen Struktur erst während der Nutzung bzw. Lagerung im Beton gebildet haben konnten.

3. Stand der Erkenntnisse

Die Ursachen der entstandenen Spätschäden und die festgestellten Merkmale ließen sich mit den vorhandenen Kenntnissen über die Wirkungen der Wärmebehandlung auf die Betoneigenschaften nur phänomenologisch erklären. Die zu Fragen der Wärmebehandlung von Beton bestehende Literatur weist überwiegend Arbeiten aus, die die Wirkung der Erhärtungsbeschleunigung betreffen, wie beispielsweise bei J. Dahms in [2]. Hinweise zu den Auswirkungen auf das Gefüge und die Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons sind von H.-J. Wierig in [6], W. Altner und W. Reichel in [4] sowie von G. Wischers in [7] eingehend beschrieben, wobei sich in [4] und [7] die Autoren auch mit den physikalischen Zusammenhängen auseinandersetzen, die zu Beeinträchtigungen der Betoneigenschaften infolge Gefügestörungen führen können. Dabei ist allerdings der chemisch-mineralogische Zusammenhang zwischen Wärmebehandlung und Phasenneubildungen nicht erfaßt worden.

Aus diesen Gründen wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie Untersuchungen aufgenommen, um zu einer weitergehenden Klärung der Schadensursachen zu kommen und um Maßnahmen zu entwickeln, durch die sich derartige Schäden zukünftig vermeiden lassen. Zum einen wurde untersucht, welche Voraussetzungen für die Bildung der neuen Phasen unter Berücksichtigung verschiedener Zemente, Wärmebehandlungs- und Lagerungsbedingungen im Beton gegeben sein müssen, und zum anderen wurde das langfristige Gefüge- und Festigkeitsverhalten von hochfesten Betonen, die unterschiedlich zusammengesetzt, wärmebehandelt und gelagert wurden, untersucht.

Mit den Schädigungen und deren Ursachen befaßte sich eingehender auch U. Ludwig und Mitarbeiter, z. B. in [8].

4. Chemisch-mineralogische Untersuchungen

Die bisherigen chemisch-mineralogischen Untersuchungen im Zementforschungsinstitut über die Ursache und den Ablauf von Phasenneubildungen aus Thaumasit und Ettringit bzw. der daraus gebildeten Mischkristalle im wärmebehandelten Beton hat H.-M. Sylla in [9] zusammenfassend dargelegt. Durch eine früh einsetzende und intensive Wärmebehandlung wird die stabile Einbindung des Sulfats in den Zementstein so verzögert bzw. verhindert, daß bei anschließender feuchter Lagerung des Betons eine Schädigung des Zementsteingefüges infolge nachträglicher sulfatabhängiger Phasenneubildungen und damit verbundener Treibreaktionen eintreten kann.

Da der Zementstein das verbindende und festigkeitsbildende Medium im Betongefüge ist, muß eine solche für den Zementstein schädigende Auswirkung, wie auch die Praxis gezeigt hat, zwangsläufig eine Beeinträchtigung der Betoneigenschaften zur Folge haben. Da zudem die Dichtigkeit des Betons maßgebend vom Zementstein abhängt, können Strukturstörungen in der Zementsteinmatrix die Feuchtigkeitszufuhr erhöhen und damit die Phasenneubildung begünstigen.

5. Betonuntersuchungen

Um die Auswirkungen der Wärmebehandlung auf die Betoneigenschaften bzw. das langfristige Betonverhalten unter besonderer Berücksichtigung der Bedingungen für die Phasenneubildungen zu klären, wurden Betonversuche durchgeführt. Spezifisches Ziel dieser Untersuchungen war es, Grenzwerte für die einzelnen verfahrenstechnischen Schritte einer Wärmebehandlung zu ermitteln, die das Entstehen von Spätschäden zuverlässig ausschließen. Diese Langzeit-Untersuchungen, die dankenswerterweise von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungseinrichtungen (AIF) finanziell unterstützt wurden, sind derzeit noch nicht vollends abgeschlossen. Dennoch lassen sich aus den bisherigen Ergebnissen verlässliche Tendenzen ableiten. Diese sind bei der derzeitigen Bearbeitung einer Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) bereits berücksichtigt worden.

5.1 Betonzusammensetzung und Probekörper

Die Untersuchungsparameter, wie die Betonzusammensetzung, die Verarbeitung und die Lagerung bis zur Prüfung, wurden in etwa so gewählt, wie sie bei den in der Praxis vorgefundenen Schäden vorgelegen hatten. Es wurden Betone gewählt, die auf schnelle Erhärtung, hohe Grünstandfestigkeit und eine hohe Festigkeit im Gebrauchszustand [10] ausgerichtet waren.

Die wesentlichen Angaben zur Betonzusammensetzung sowie die Daten zu den Frischbeton- und den Festbetoneigenschaften sind in Tafel 2 angegeben. Als Probekörper für die Langzeitversuche wurden 10-cm-Würfel und Balken mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm x 50 cm hergestellt. Bei der Probekörperherstellung wurden die in der Betonwerkspraxis vorkommenden Fertigungsarten, wie das Belassen in einer allseitig geschlossenen Form, das Belassen in einer oben offenen Form und das Sofortentformen [11] mit den drei im Bild 3 gezeigten Formzuständen nachvollzogen.

Tafel 2 Angaben zur Betonzusammensetzung sowie zu den Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der Versuchsbetone

Art/Eigenschaft	Kennwert
<i>Betonzusammensetzung</i>	
Zement	PZ 55
Zuschlag	Kiessand 0/16 mm
Zementgehalt	400 ± 20 kg/m ³
Wasserzementwert	0,36
<i>Betoneigenschaften</i>	
Verdichtungsmaß (nach Walz)	1,60 bis 1,65
Frischbetonrohddichte	2,40 bis 2,42 kg/dm ³
Luftgehalt	~ 2 Vol.-%
Druckfestigkeit (gem. DIN 1048)	nach 7d nach 28d
	60 bis 70 N/mm ² 70 bis 80 N/mm ²



Bild 3 Unterschiedliche Umschließung der Probekörper (Formzustand) während der Wärmebehandlung bei den Laborversuchen

5.2 Lagerungsbedingungen

Da die freie Bewitterung bei den beobachteten Schadensabläufen einen wesentlichen Einfluß ausübte, wurde sie bei den Untersuchungen im Labor durch eine Feucht-Trocken-Wechselagerung mit diffusionsfördernden Bedingungen und Frost-Tauwechsel als mechanische Gefügebeanspruchung simuliert, siehe Tafel 3.

Tafel 3 Lagerungsbedingungen bei der Feucht-Trocken-Wechselagerung im Labor zur Simulation der freien Bewitterung

Wirkung	Temperatur-/ Feuchtigkeits- bedingungen	Dauer
Durchfeuchten	20 °C/ Nebelkammer	1 Monat
Aufsaugen	20 °C/ Fußbad	1 Monat
Trocknen	20 °C/ 65% rel. Luftfeuchte	1 Monat
Frostwechsel	Einfrieren + Auftauen unter Wasser	10 FTW*)

*) jeweils nach Ablauf eines Jahres bzw. vier Zyklen

5.3 Temperatur-Zeit-Zyklen

Die Wärmebehandlungen erfolgten bei den Versuchen nach den im Bild 4 gezeigten Temperatur-Zeit-Kurven. Dabei entspricht die durchgezogene Linie wegen der hohen Aufheizgeschwindigkeit von 60° C/h und des Temperaturmaximums von 80° C einer intensiven oder Kurzzeit-Wärmebehandlung. Die gestrichelte Linie beschreibt dagegen einen milden Wärmebehandlungsverlauf, wie er nach den Erkenntnissen aus den chemisch-mineralogischen Untersuchungen in [9] festgelegt wurde. Eine Vorlagerungsdauer von drei Stunden bei 30° C und eine Aufheizung mit 20° C/h auf eine Maximaltemperatur von 65° C entsprechen den Werten für einen im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit unkritischen Ablauf der Hydratphasenbildung.

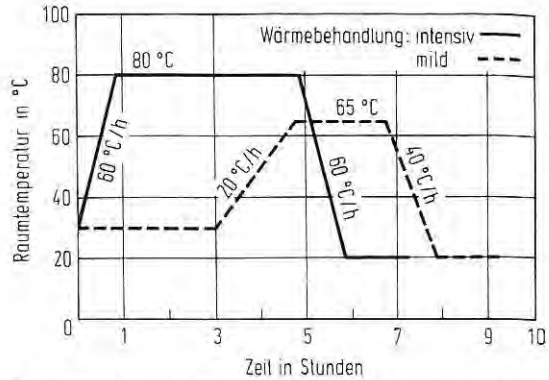


Bild 4 Temperatur/Zeit-Verlauf der Wärmebehandlungsprogramme bei den Laborversuchen

6. Untersuchungsergebnisse

6.1 Wirkung der Temperaturen im Beton

Wie auch die Praxis bestätigt, weichen infolge des zeitlichen Wärmeübergangs die Betontemperaturen von den Raumtemperaturen in den Behandlungskammern ab. Die Größenordnung der Abweichungen hängt von Art und Umfang der den Beton umgebenden Form und der Masse des Betons ab. Bild 5 zeigt für den zeitlichen Verlauf der intensiven und milden Wärmebehandlung die Temperaturverläufe im Beton in der Mitte von 30-cm-Würfeln in der Form. Als Hinweis auf das Temperatur-Zeit-Verhalten infolge der Hydrationswärme in einem nicht wärmebehandelten Beton ist der Temperaturverlauf in einem bei 20° C-Lufttemperatur gelagerten gleichartigen Probekörper strichpunktiert angegeben.

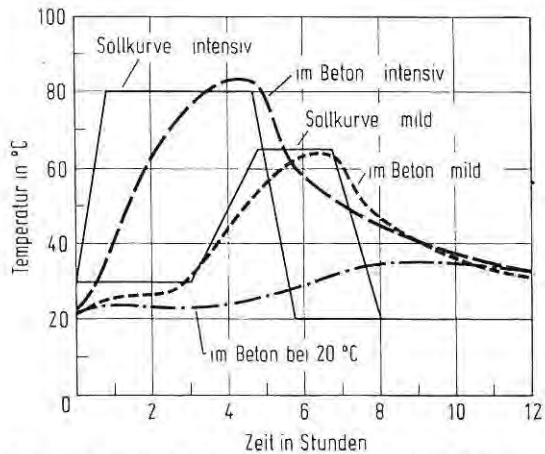


Bild 5 Temperaturverlauf in der Mitte von 30-cm-Probewürfeln (in der Form) bei unterschiedlich intensiver Wärmebehandlung sowie bei Lagerung bei 20° C

Da die Höhe der Betontemperatur und der Zeitpunkt ihrer Einwirkung sowohl die Sulfatbindung als auch die Gefügedichte — und damit die Voraussetzungen für die Phasenneubildungen — beeinflussen, sind die Unterschiede in den wärmebehandlungsabhängigen Temperaturverläufen von besonderer Bedeutung für die Dauerhaftigkeitseigenschaften der Betone.

Obwohl sich bei der schnellen Aufheizung zu Beginn der intensiven Wärmebehandlung die Temperaturerhöhung im Beton deutlich verzögert, werden bereits nach zwei Stunden im Beton 60° C überschritten und nach drei Stunden 80° C erreicht. Eine derart schnelle und hohe Aufheizung führt zu Temperaturverhältnissen und Gefügebedingungen im Beton, die die Voraussetzungen für spätere Phasenneubildungen schaffen. Bei diesen Temperaturen wird zumindest ein Teil des Calciumsulfats nicht in den stabilen Ettringit oder Monosulfat, sondern in wenig stabiler Form an Calciumsilikathydrate angelagert und verbleibt so bei Feuchtigkeitzufuhr mobilisierbar für eine sekundäre Phasenbildung [9]. Durch temperaturbedingte Ausdehnungsvorgänge und Austrocknung können, wie auch J. Odler in [12] ausführte, bei diesem Temperaturniveau verstärkt Gefügebeeinträchtigungen auftreten, wie z. B. feine Risse und Spalten, vornehmlich um die Zuschläge. Ursachen hierfür sind im wesentlichen das unterschiedliche Temperatúrausdehnungsverhalten des noch nicht in die Hydratphasen eingebundenen Wassers und der Zementfeststoffmasse. Diese Störungen haben einerseits physikalisch einen negativen Einfluß auf die Frühfestigkeit und tragen andererseits bei feuchter Lagerung zu einer schnelleren Durchfeuchtung des Betons und damit zu Diffusions-, Lösungs- und Transportvorgängen im Beton bei.

Demgegenüber wurden beim milden Wärmebehandlungszyklus am Ende der Vorlagerungszeit von drei Stunden nur 30° C, nach sechs Stunden maximal sogar weniger als die Solltemperatur von 65° C erreicht. Dadurch läuft die Sulfatbindung weitgehend normal ab, und es werden keine nennenswerten Gefügestörungen bei diesen Temperaturen hervorgerufen. Der nicht wärmebehandelte Beton erreichte maximal nur 35° C — und dies erst nach acht bis neun Stunden —, weshalb keine nachteiligen Auswirkungen im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit des Betons entstanden.

6.2 Frühfestigkeit

Wenn intensive Wärmebehandlungszyklen zu ungünstigen Dauerhaftigkeitseigenschaften im Beton führen können, fragt sich, ob derartige Erhärtungsbeschleunigungen für die Praxis überhaupt notwendig sind. Die produktionsbedingten Frühfestigkeitsanforderungen, siehe Tafel 1, sind im Prinzip ausschlaggebend für die benötigte Behandlungsintensität.

Bild 6 zeigt in Abhängigkeit von der Wärmebehandlungsintensität und dem Umschließungsgrad des Betons während der Wärmebehandlung die erzielbaren Frühfestigkeiten, d. h. die Betondruckfestigkeit am Ende der Wärmebehandlung. Für den nicht wärmebehandelten Beton ist die Druckfestigkeit nach Ablauf von acht Stunden Erhärtungsdauer in der Form bei 20° C Umgebungstemperatur angegeben. Die Frühfestigkeitsergebnisse verdeutlichen, daß unter

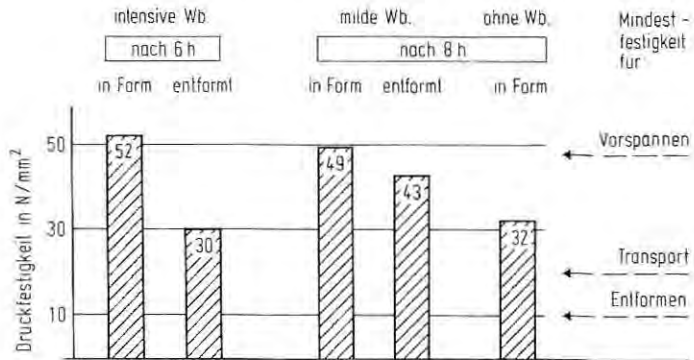


Bild 6 Frühfestigkeit von hochfestem Beton in Abhängigkeit von der Intensität der Wärmebehandlung und dem Formzustand sowie bei normaler Erhärtung

günstigen Bedingungen — Behandlung in der Form — mit beiden Wärmebehandlungsarten bei einer Zeitdifferenz von zwei Stunden in etwa die gleichen Festigkeiten von rd. 50 N/mm² erzielt werden konnten. Einen Hinweis auf das Ausmaß der Gefügebbeeinträchtigungen durch eine intensive Wärmebehandlung im Gegensatz zur milden vermitteln die Frühfestigkeiten von entformt wärmebehandeltem Beton. Während sich bei der milden Wärmebehandlung nur eine Druckfestigkeitseinbuße von 12% (6 N/mm²) ergab, lag sie bei der intensiven Wärmebehandlung mit 40% (22 N/mm²) über dreifach so hoch. Eine Umschließung des Betons durch die Form während der Wärmebehandlung begrenzt die Verformbarkeit und vermindert das Austrocknen, was zu einem dichteren Gefüge und damit auch zu höherer Festigkeit führt.

Die Frühfestigkeitsergebnisse deuten darauf hin, daß selbst die betrieblich erforderlichen höchsten Festigkeitsbereiche nicht unbedingt eine intensive Wärmebehandlung bedingen, wengleich der zeitliche Mehrbedarf von zwei Stunden nicht übersehen werden darf. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang jedoch auch die Tatsache, daß sich die niedrigeren Festigkeitsbereiche, wie sie für den betrieblichen Ablauf beispielsweise in einem Betonwerk von Interesse sind, mit entsprechend zusammengesetzten Betonen auch ohne eine Wärmebehandlung in einer Acht-Stunden-Frist realisieren lassen. Ein Einsatz einer Wärmebehandlung könnte zwar auch für diese Zwecke zeitsparend wirken. Es müßte aber auf keinen Fall eine intensive Wärmebehandlung sein, durch die Langzeitrisiken entstehen.

6.3 Langzeitverhalten wärmebehandelter Betone

In der Praxis zeigten geschädigte Betone eine abnehmende Festigkeit infolge von Gefügestörungen. Sie führten äußerlich zu einem diffusen Ribbild und waren im Inneren stets mit Phasenneubildungen verbunden. Diese schädigenden Vorgänge im Gefüge ließen sich bei den Versuchen unter den Laborbedingungen nachvollziehen, und die Auswirkungen auf die Betoneigenschaften konnten da-

bei festgestellt werden. Die Betonuntersuchungen gaben Aufschluß darüber, ob und unter welchen Wärmehandlungsbedingungen mit mangelnder Dauerhaftigkeit zu rechnen ist.

Als Beurteilungskriterien für das Langzeitverhalten wurden die Druckfestigkeit, der dynamische Elastizitätsmodul, der zerstörungsfrei mittels Resonanzfrequenz ermittelt wurde, und der Gefügestand herangezogen. Die Bewertung des Gefügestandes erfolgte anhand des Befundes, der sich zum äußeren Rißbild, zum Ausmaß an Phasenneubildungen, zum Bruchverhalten bei der Druckprüfung und zum Verbund von Zementstein und Zuschlag ergab. Ein abschließendes Urteil über das Langzeitverhalten ist bei diesen komplexen Vorgängen nur aufgrund einer gemeinsamen Interpretation der jeweils zusammengehörenden Einzelergebnisse möglich.

6.3.1 Festigkeitsverhalten

Die Bilder 7 und 8 zeigen für eine Betonart des Versuchsprogramms die an 10-cm-Würfeln ermittelte Druckfestigkeit und den an Balken 10 cm x 10 cm x 50 cm gemessenen Elastizitätsmodul, aufgetragen über dem Betonalter in Jahren. Obwohl hier nur Ergebnisse eines Betons vorgestellt werden, sind diese repräsentativ auch für Betone aus anderen Zementen und für andere, entsprechend hergestellte Betone.

Unmittelbar nach der Wärmebehandlung wiesen die Betone die in Bild 7 auf der Ordinate angegebene Druckfestigkeit auf. Innerhalb eines Jahres erfolgte bei allen Betonen eine Festigkeitssteigerung in etwa der gleichen Größenordnung. Beim entformt scharf wärmebehandelten Beton trat danach ein kontinuierlicher Festigkeitsabfall ein, während bei den übrigen Betonen bei Beibehaltung des unterschiedlichen Festigkeitsniveaus praktisch kein Festigkeitsabfall, sondern sogar beim entformt milde wärmebehandelten Beton ein

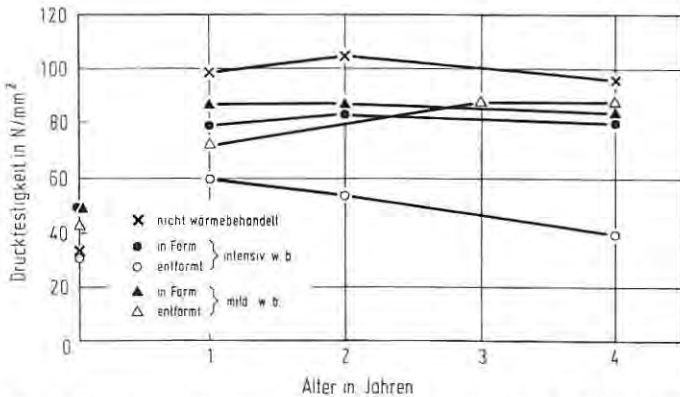


Bild 7 Entwicklung der Betondruckfestigkeit an 10-cm-Probewürfeln nach unterschiedlicher Wärmebehandlung und anschließender zyklischer Wechsellagerung

merklicher Druckfestigkeitsanstieg eintrat. Da der so behandelte Beton ein sehr sprödes Bruchverhalten aufwies und da praktisch keine Phasenneubildungen im Gefüge der Probekörper zu finden waren, darf man davon ausgehen, daß dieser Beton durch die milde Wärmebehandlung im entformten Zustand zwar eine reduzierte Anfangsfestigkeit aufwies, daß aber in späterem Alter keine Einflüsse auftraten, die auf eine Dauerhaftigkeitsbeeinträchtigung hinweisen. (Der relativ geringe Druckfestigkeitsabfall des nicht wärmebehandelten Betons im Alter von vier Jahren dürfte auf das spröde Verhalten von Beton mit Druckfestigkeiten um 100 N/mm^2 und auf die bei diesen Lagerungsbedingungen auftretenden Eigenspannungszustände zurückzuführen sein; jedenfalls wurden keinerlei Hinweise auf mögliche Gefügebeeinträchtigungen bei diesem Beton festgestellt.)

6.3.2 Elastizitätsmodul

Wie aus Bild 8 hervorgeht, entsprach die Entwicklung des dynamischen Elastizitätsmoduls über den Zeitraum von viereinhalb Jahren weitgehend der der Druckfestigkeit. Eine scharfe Wärmebehandlung am entformten Betonbalken bewirkte dabei ebenfalls nach einem Anstieg bis zu einem Jahr einen dann deutlichen Abfall des Elastizitätsmoduls. Wie bei der Druckfestigkeit lag der E-Modul des nicht wärmebehandelten Betons deutlich über dem der wärmebehandelten Betone. Die zerstörungsfreie Bestimmung des dynamischen E-Moduls am gleichen Prüfkörper über einen längeren Zeitraum eignet sich offensichtlich recht gut zur Beurteilung des Langzeitverhaltens wärmebehandelter Betonprüfkörper.

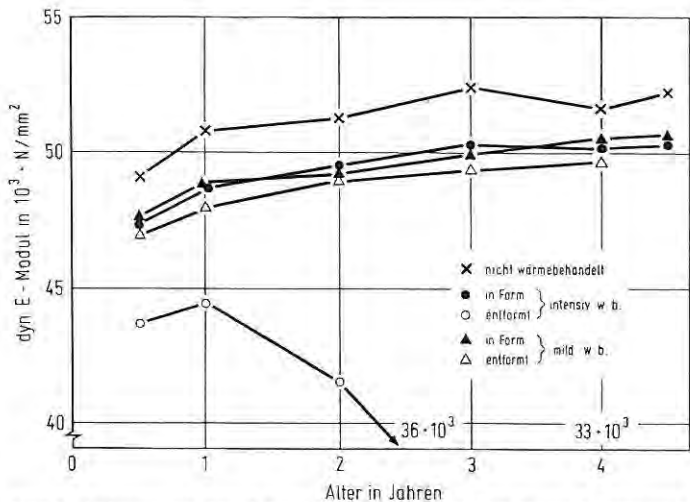


Bild 8 Entwicklung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Betonprobekörpern ($10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$), nach unterschiedlicher Wärmebehandlung und anschließender zyklischer Wechsellagerung

6.3.3 Äußeres und inneres Erscheinungsbild

So wie im Gefüge von geschädigten Bauteilen der Praxis sind auch an den Versuchsbetonen Phasenneubildungen im Inneren entstanden. Diese sind als weißer Belag vor allem in den Kontaktzonen zwischen Zementstein und Zuschlag oder auf der geschliffenen Druckfläche als weiße Linien um die Zuschläge zu erkennen. Bild 9 zeigt, wie die im Inneren eingetretene Gefügebeeinträchtigung äußerlich zu einem starken Ribbild geführt hat, vergleiche auch Bild 2.

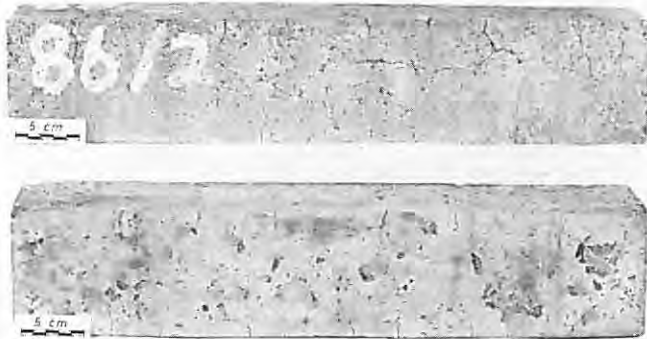


Bild 9 Ribbildung auf der Oberfläche eines Probekörpers (10x10x50 cm³), der im entformten Zustand intensiv wärmebehandelt wurde, nach sechsjähriger Außenlagerung. Oben: eine Seitenfläche, unten: Herstell- und Lagerungsunterseite

6.3.4 Gesamtbeurteilung der Langzeitversuche

Beurteilt man die langfristige Festigkeitsentwicklung und den Gefügebefund der unterschiedlich behandelten Betone gemeinsam, siehe Tafel 4, so ergibt sich mit deutlich ausgeprägter Tendenz, daß eine intensivere Wärmebehandlung und ein geringerer Umschließungsgrad der Prüfkörper zu einem niedrigeren Festigkeitsniveau und stärkeren Gefügestörungen führten. Das niedrigste Festigkeitsniveau mit starkem späterem Abfall wies der im entformten Zustand intensiv wärmebehandelte Beton auf, bei dem sich bereits nach einem Jahr starke Phasenneubildungen und später starke Gefügeschädigungen zeigten. Der nicht wärmebehandelte Beton erreichte das höchste Festigkeitsniveau. Dabei waren auch später keine Phasenneubildungen festzustellen, der Verbund war intakt und der Bruch dadurch spröde. Die Langzeit-Festigkeit aller in einer Form wärmebehandelten Betone lag etwa auf dem gleichen Niveau, jedoch deutlich unter dem des nicht wärmebehandelten Betons. Eine unterschiedlich intensive Wärmebehandlung hatte offenbar in dem untersuchten Zeitraum von vier Jahren nur einen untergeordneten Einfluß auf das Festigkeitsverhalten, hingegen wohl einen deutlichen Einfluß auf die Phasenneubildung sowie den Verbund und da-

Tafel 4 Tendenzielles Verhalten der Versuchsbetone hinsichtlich Festigkeit, Phasenneubildung und Verbund in Abhängigkeit von den Wärmebehandlungsbedingungen

Wärmebehandlung		langfristiges Festigkeitsverhalten	Phasenneubildung	Verbund
nicht wärmebehandelt		sehr hoch; geringer Abfall	keine	intakt
intensiv wärmebehandelt	in Form	hoch; gleichbleibend	stark	leicht gestört
	entformt	niedrig; starker Abfall	sehr stark	stark gestört
mild wärmebehandelt	in Form	hoch; gleichbleibend	keine	intakt
	entformt	mittel; angestiegen	nur außen; innen keine	intakt

mit auf das Gefüge. Im Gegensatz zum milde wärmebehandelten Beton waren in dem intensiv wärmebehandelten Beton in merklichem Umfang neue Phasen und Verbundstörungen festzustellen. Dieser Befund ist ein deutlicher Hinweis auf ein infolge Wärmebehandlung entstandenes Schadensrisiko. Nach den bisherigen Erfahrungen kann man nicht ausschließen, daß bei diesem Beton zu einem späteren Zeitpunkt noch stärkere Gefügestörungen mit einer Entfestigung auftreten werden.

Insgesamt muß man aus den bisherigen Untersuchungen daher folgern, daß bei einer intensiven Wärmebehandlung und anschließender feuchter Lagerung stets ein erhöhtes Schadenspotential vorhanden ist.

7. Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen

7.1 Entstehungsbedingungen für neue Phasen

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zur Frage der Dauerhaftigkeit von wärmebehandeltem Beton verdeutlichen bei Einbeziehung der Erkenntnisse aus den chemisch-mineralogischen Untersuchungen aus [9], daß die mit Festigkeitseinbußen verbundenen Langzeitschäden an wärmebehandelten Betonbauteilen stets mit Phasenneubildungen im Gefüge verbunden waren. Diese können nur auftreten, wenn die nachfolgenden drei Grundvoraussetzungen erfüllt sind.

- Die notwendigen stofflichen Reaktionspartner für die Phasenneubildungen, vor allem nicht gebundenes bzw. mobilisierbares Sulfat, müssen im Zementstein vorliegen.
- Es muß Feuchtigkeit, d. h. Wasser, für das Lösen und den Transport des Sulfats und anderer Bestandteile im Gefüge vorhanden sein.
- Klüfte und Störungen im Gefüge müssen als Wege für das Eindringen von Wasser und die Verteilung bzw. Wanderung der Lösun-

gen im Gefüge sowie als Räume für die Kristallisation der sekundären Phasen zur Verfügung stehen.

Da sich aus den Untersuchungen zudem ableiten läßt, unter welchen Wärmebehandlungsbedingungen diese Grundvoraussetzungen entstehen und welcher Einfluß bzw. welche Wechselwirkungen bestehen, konnten Maßgaben bzw. Grenzwerte aufgestellt werden, um die Dauerhaftigkeitsschäden zu vermeiden.

7.2 Maßgaben und Grenzwerte

Den Vorstellungen der Praxis nach möglichst intensiven, d. h. produktionsbeschleunigenden, Wärmebehandlungsabläufen kann dadurch Rechnung getragen werden, daß für die Wärmebehandlung eine Abstufung in der Intensität in drei Stufen vorgenommen wird, wobei diese jeweils mit bestimmten Bedingungen für den Ablauf der Wärmebehandlung und den Anwendungsbereich, d. h. die Umweltbedingungen der Bauteile verknüpft werden, siehe Tafel 5. Diese Bedingungen bewirken, daß die Bildung neuer Phasen entweder erst gar nicht abläuft oder aber auf ein geringes, praktisch risikoloses Ausmaß begrenzt bleibt.

Für die Stufe I sind die für die Sulfatbindung ungünstigen Voraussetzungen — wie nur eine Stunde Vorlagerungsdauer und eine Betontemperatur von 80 °C — nur dann zu verantworten, wenn Bauteile im Inneren von Gebäuden und nicht in Feuchträumen verwendet werden. Dadurch ist die für eine Phasenneubildung notwendige Feuchtigkeitzufuhr ausgeschlossen und somit ein Schadensrisiko nicht gegeben.

Die beiden Stufen II und III sehen eine Reduzierung und Abstufung der Solltemperaturen auf 70 °C bzw. 60 °C bei jeweils einer um eine Stunde verlängerten Vorlagerungsdauer vor. Diese einschränken den Vorgaben für die Wärmebehandlung sind bei der Fertigung von Außenbauteilen zu beachten, bei denen eine Feuchtigkeitzufuhr zwangsläufig nicht zu vermeiden ist. Allerdings ist die Feuchtigkeitseinwirkung erfahrungsgemäß bei z. B. normalen Hochbau-Bauteilen, wie Fassadenplatten, weniger intensiv als bei Bauteilen, die sich dauernd im Kontakt mit dem Erdbereich befinden und bei denen eine permanente Feuchtigkeitzufuhr besteht. Eine Feuchtigkeitswanderung entsteht besonders dann, wenn erdberührte Bauteile eine der Luft zugewandte freie Oberfläche haben, d. h. einen Feuchtigkeitsgradienten aufweisen. Bei derartigen Bauteilen sind daher die stärksten Restriktionen für den Ablauf der Wärmebehandlung angezeigt. Die Höchsttemperatur ist dann zur Sicherung der Sulfatbindung auf 60 °C begrenzt, und für die Vorlagerung ist eine Zeitdauer von drei Stunden einzuhalten.

Die Abstufung der Maßgaben und Grenzwerte für die Anwendung von Wärmebehandlungen beruht auf den Erkenntnissen aus den labormäßigen Untersuchungen und orientiert sich hinsichtlich der für die Höhe der Feuchtezufuhr maßgeblichen Lagerungsbedingungen an den unterschiedlichen Fällen in der Praxis. Zur Vereinfachung der Handhabung in der Praxis und zum Abbau von Risiken kann es durchaus sinnvoll sein, in nur zwei Stufen zu differenzieren; z. B. Innenbauteile nach Stufe I und Außenbauteile nach Stufe III gemäß Tafel 5.

Tafel 5 Empfehlung für die Abstufung der Wärmebehandlungsintensität in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich der Bauteile

Intensität der Wärmebehandlung	Stufe I	Stufe II	Stufe III
Vorlagerungsdauer in Stunden	1	2	3
Solltemperatur in der Haltephase in °C	80	70	60
Anwendungsbereich der Bauteile	Innenbauteile keine Feuchträume	Außenbauteile nicht erdberührt dauernd erdberührt	

8. Zusammenfassung

Die bisherigen Ergebnisse der Betonuntersuchungen zur Frage der Wärmebehandlung von hochfesten Betonen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

8.1 Bei hochfesten Betonen bedingen die betrieblich erforderlichen Frühfestigkeiten nicht unbedingt eine intensive Wärmebehandlung. Bei geringfügig längeren Fristen können auch mit einer milden Wärmebehandlung relativ hohe Frühfestigkeiten erreicht werden. Dadurch lassen sich Dauerhaftigkeitsrisiken vermeiden.

8.2 Bei den Laborversuchen konnten die schädigenden Vorgänge, wie sie an wärmebehandelten Außenbauteilen in der Praxis festgestellt wurden, nachvollzogen werden. Anhand der Laborversuche konnten daher die Einflußgrößen auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften wärmebehandelter Betone hinreichend zuverlässig erfaßt werden.

8.3 Eine intensive Wärmebehandlung mit kurzer Vorlagerung und schnellem, hohem Aufheizen auf rd. 80 °C kann einerseits ungünstige Zementsteineigenschaften insofern bewirken, als die chemisch-mineralogischen Voraussetzungen für Phasenneubildungen geschaffen werden. Andererseits können dadurch Gefügestörungen infolge unterschiedlicher Temperaturdehnungen im Beton eintreten. Bei anschließend feuchter Lagerung des Betons sind somit die Bedingungen für das Entstehen von Phasenneubildungen erfüllt. Sind diese Voraussetzungen beide erfüllt, so muß man mit Dauerhaftigkeitsschäden rechnen.

8.4 Aufgrund der Erkenntnisse aus den Betonversuchen lassen sich Empfehlungen für sachgerechte Wärmebehandlungsabläufe ableiten. Die damit verbundenen Grenzwerte, die in Abhängigkeit von den bestimmungsmäßigen Lagerungsbedingungen der Bauteile gelten, regeln im wesentlichen die erforderliche Dauer der Vorlagerung und die Solltemperatur während der Haltephase. Eine milde Wärmebehandlung, d.h. ausreichende Vorlagerung von rund drei Stunden bei 30 °C und mäßiges Aufheizen bis maximal 60 °C, vermeidet die Entstehungsbedingungen für Phasenneubildungen und führt daher selbst bei ungünstigen Lagerungsbedingungen nicht zu Dauerhaftigkeitseinbußen.

SCHRIFTTUM

- [1] Wischers, G.: Einfluß der Zusammensetzung des Betons auf seine Frühfestigkeit. beton 13 (1963) H. 9, S. 427/432; ebenso Betontechnische Berichte 1963, Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 137/151
- [2] Dahms, J.: Beton hoher Frühfestigkeit. Betonwerk + Fertigteil-Technik 40 (1974) H. 6, S. 402/408
- [3] Changgeng, L.: Industrielle Herstellung von Betonfertigteilen in China. Betonwerk + Fertigteil-Technik 52 (1986) H. 5, S. 318/322
- [4] Altner, W., und W. Reichel: Betonschnellhärtung; Grundlagen und Verfahren. Beton-Verlag, Düsseldorf 1981
- [5] Erlin, B., und D.C. Stark: Identification and occurrence of Thaumassite in concrete. Highway Res. Rec. (1965) Nr. 113, S. 108/113
- [6] Wierig, H.-J.: Kurzzeitwarmbehandlung von Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 41 (1975) H. 9, S. 418/423 und H. 10, S. 492/495
- [7] Wischers, G.: Anmerkungen zum Merkblatt für die Herstellung geschlossener Betonoberflächen bei einer Wärmebehandlung. beton 17 (1967) H. 3, S. 101/103, und H. 4, S. 139/142; ebenso Betontechnische Berichte 1967, Beton-Verlag, Düsseldorf 1968, S. 35/50
- [8] Ludwig, U., und D. Heinz: Einflüsse auf die Schadreaktionen in wärmebehandelten Betonen, in: Baustoffe 1985, Aachen. Festschrift Prof. K. H. Wesche, Bauverlag Wiesbaden-Berlin
- [9] Sylla, H.-M.: Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung. beton 38 (1988) H. 11, S. 449/454
- [10] Wierig, H.-J.: Einige Beziehungen zwischen den Eigenschaften von „grünen“ und „jungen“ Betonen und denen des Festbetons. beton 21 (1971) H. 11, S. 445/448, und H. 12, S. 487/490
- [11] Lieske, H.: Neuentwicklungen im Bereich der Spannbetonschwellen. Betonwerk + Fertigteil-Technik 52 (1986) H. 6, S. 381/383
- [12] Odler, J.: Über die Ribbildung bei der Warmbehandlung von Beton. beton 35 (1985) H. 6, S. 235/237