

Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton *)

Von Gerd Wischers und Wilhelm Manns, Düsseldorf

Übersicht

Durch das Erstarren und Erhärten entsteht aus dem Frischbeton der Festbeton. In dem Übergangsstadium, das mit dem Begriff „junger Beton“ gekennzeichnet wird, ist der Beton verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt, die Zugspannungen hervorrufen. Überschreiten diese Spannungen die noch sehr geringe Zugfestigkeit des jungen Betons, so bilden sich Risse. Junger Beton ist daher gegen Umwelteinflüsse, die Dehnungen hervorrufen, weniger widerstandsfähig als Beton im frischen oder festen Zustand.

Die Zugspannungen in jungem Beton können auf sehr unterschiedliche Ursachen zurückgehen. Bei Forschungsarbeiten der letzten Jahre haben sich drei Einflüsse als maßgebliche Ursachen für das Entstehen von Zugspannungen und gegebenenfalls auch Rissen in jungem Beton herausgestellt; es sind dies Formänderungen und Setzungen der Schalung, rasche Temperaturänderung des erstarrten Betons sowie scharfes Austrocknen des frisch verdichteten Betons.

Versuchsmäßig wurde vor allem der Frage nachgegangen, ob und unter welchen Bedingungen unterschiedlich starkes Austrocknen des fertig eingebauten Betons alleinige Ursache für eine Ribbildung sein kann. Der Einfluß von Wassergehalt, Mehlkornzusammensetzung, Frischbetontemperatur und Umweltbedingungen wurde an Versuchsplatten untersucht, denen das Verhalten einer dünnen, großflächigen Platte aufgezwungen wurde.

Risse durch vorzeitiges Austrocknen entstanden insbesondere dann, wenn der Beton einen hohen Wassergehalt und zugleich ein hohes Wasserrückhaltevermögen aufwies und wenn infolge der Umweltbedingungen ein hoher Dampfdruckunterschied zwischen Betonoberfläche und umgebender Luft herrschte sowie Wind für die Aufrechterhaltung dieses Dampfdruckunterschiedes sorgte. Während Beton mit einem Wassergehalt über 250 l/m^3 zur Ribbildung neigt, führt ein Wassergehalt unter 200 l/m^3 nur bei besonders ungünstigen Bedingungen zu einer Ribbildung durch scharfes Austrocknen.

Eine frühzeitige und ausreichende Nachbehandlung erwies sich als eine wirksame Maßnahme, um Risse in jungem Beton durch

*) Nach einem Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung 1972 des Vereins Deutscher Zementwerke am 21. September in Berlin.

Austrocknen zu vermeiden. Solche Trocknungsrisse (Schrumpfrisse) können meist unmittelbar nach dem Entstehen durch Nachverdichten wieder geschlossen werden.

1. Allgemeines

Maßgebend für die Verwendungsmöglichkeiten von Beton sind die Eigenschaften, die der fest gewordene Beton aufweist. Festbeton entsteht durch das Erstarren und Erhärten des Frischbetons. Der Übergang vom Frisch- zum Festbeton geschieht nicht plötzlich, sondern er umfaßt je nach der Betonzusammensetzung und den Erhärtingsbedingungen einen Zeitraum von wenigen Stunden bis zu knapp einem Tag. Verschiedene Stadien dieser Übergangsphase werden durch betontechnologische Begriffe gekennzeichnet, siehe Bild 1. Der eingebaute und fertig verdichtete Frischbeton wird dabei als „grüner Beton“ bezeichnet, solange das Erstarren noch nicht merklich eingesetzt hat. Als „jungen Beton“ bezeichnet man den erstarrten Beton, der sich in der Anfangsphase seiner Erhärtung befindet. Grüner und junger Beton kennzeichnen daher zwei zeitlich aufeinanderfolgende, jedoch nicht gegeneinander scharf abgegrenzte Phasen des Übergangs vom Frisch- zum Festbeton.

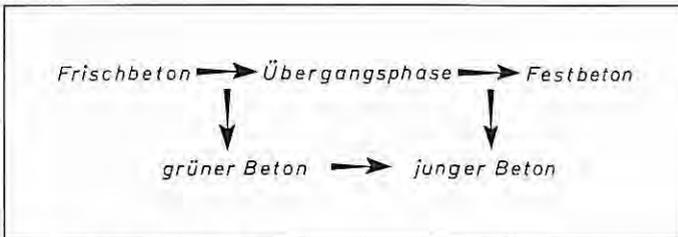


Bild 1 Kennzeichnung von Beton nach dem Erhärtungszustand

Frischbeton mit steif-plastischer bis weicher Konsistenz, wie er überwiegend im Betonbau verwendet wird, weist als grüner Beton praktisch keine Festigkeit und eine hohe Verformbarkeit auf [1]. Äußere Einflüsse, wie z. B. Formänderungen der Schalung, rufen zu diesem Zeitpunkt daher auch noch keine Zwängungsspannungen hervor. Das ändert sich jedoch, wenn der grüne Beton durch das Erstarren und die beginnende Erhärtung in jungen Beton übergeht.

Nach dem Erstarren des Betons steigt mit zunehmender Erhärtung die Festigkeit anfangs langsam, dann schneller werdend an. Die zunächst sehr große Verformbarkeit des Betons nimmt dabei stark ab, durchläuft ein Minimum und steigt anschließend mit zunehmender Festigkeit wieder etwas an, siehe Bild 2. Gegenüber bestimmten Einwirkungen ist sowohl Frischbeton als auch Festbeton entweder unempfindlich oder sehr widerstandsfähig. Gleiche Einwirkungen können jedoch in dem in Bild 2 angegebenen Bereich niedriger Festigkeit und geringer Verformbarkeit gelegentlich zu Rissen in jungem Beton führen.

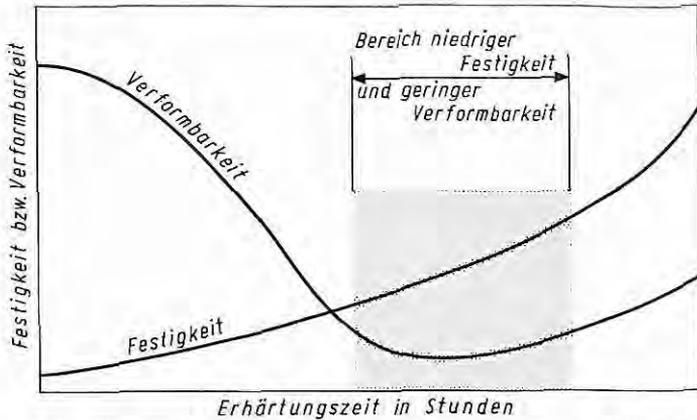


Bild 2 Entwicklung der Festigkeit und Verformbarkeit von jungem Beton (schemat. Darstellung)

Durch die mit der Hydratation des Zements einhergehenden Vorgänge, wie z. B. die Entwicklung von Wärme, und durch die Umweltbedingungen, wie z. B. die Lagerungstemperatur und die rel. Luftfeuchte, entstehen praktisch in jedem Betonteil während der Erhärtung durch behinderte Verformung Zwängungsspannungen. Die Zwängungsspannungen in dieser Übergangsphase können unterschiedlich groß sein, was sowohl von der Größe der Einwirkungen als auch von den zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Verformungseigenschaften abhängt. Ob dabei ein Riß entsteht, hängt von der jeweils vorhandenen Festigkeit ab. In Bild 3 ist die Entwicklung der Zwängungsspannungen und der Festigkeit schematisch dargestellt. Liegen die Zwängungsspannungen unterhalb der Festigkeit, was meistens der Fall ist, so tritt kein Riß auf. Über-

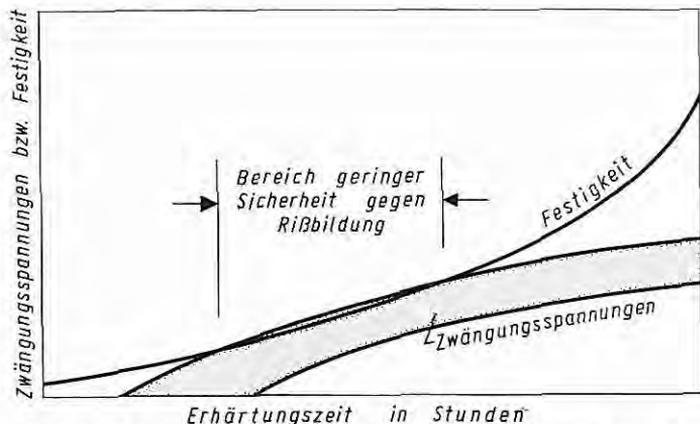


Bild 3 Entwicklung von Festigkeit und Zwängungsspannungen in jungem Beton (schemat. Darstellung)

schreiten die Zwängungsspannungen die Festigkeit, so werden ein oder mehrere Entlastungsrisse entstehen.

Während des Erstarrens und Erhärtens des Betons ist die Gefahr, daß die Zwängungsspannungen größer sind als die Festigkeit, nicht ständig gegeben. Die Gefahr besteht nur innerhalb eines kritischen Bereichs, dessen Beginn und Dauer je nach den Verhältnissen im Einzelfall verschieden sein kann. Dieser Bereich dürfte im allgemeinen jedoch kaum vor der zweiten Stunde nach dem Einbringen beginnen und gewöhnlich nicht länger als 4 bis 16 Stunden dauern. Während die Festigkeit des Betons als Folge der Hydratation stetig zunimmt, wirkt den gleichzeitig entstehenden Zwängungsspannungen aus den Umwelteinflüssen die Relaxation entgegen, so daß die Entwicklung der Zwängungsspannungen nach Durchlaufen der kritischen Phase immer mehr hinter der Festigkeitsentwicklung zurückbleibt.

Innerhalb des kritischen Zeitraums steht der junge Beton vermutlich häufig kurz vor dem Riß, ohne daß dies durch äußere Anzeichen zu erkennen ist. In solchen Fällen genügen nur noch geringe weitere Einwirkungen, die sehr verschiedenartiger Natur sein können, um die Zwängungsspannungen über die Festigkeit anzuheben und dadurch einen Riß auszulösen. Hierauf beruhen auch die in der Praxis sehr unterschiedlichen Meinungen über die Ursache solcher Risse und die Feststellung, daß Risse unter anscheinend gleichen Verhältnissen einmal aufgetreten sind und beim anderen Mal nicht. Aus den Erfahrungen der Praxis ist bekannt, daß Risse in jungem Beton, wenn sie überhaupt entstehen, vorwiegend in großflächigen horizontalen Platten des Hochbaus, des Brückenbaus und des Fahrbahndeckenbaus auftreten. Aus Untersuchungen, die hierzu in den letzten Jahren in verschiedenen in- und ausländischen Forschungsinstituten durchgeführt worden sind [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 u. a.], kann man schließen, daß größere Zwängungsspannungen in jungem Beton und damit die Gefahr von Rissen im wesentlichen auf drei, ihrer Natur nach sehr verschiedenartige Ursachen zurückzuführen sind; es sind dies

- Formänderungen der Schalung,
- rasche Änderung der Umwelttemperatur und
- Wasserentzug durch schnelles Trocknen.

Im Normalfall rufen diese Ursachen, auch wenn sie in mittlerer Intensität gleichzeitig einwirken, keine Risse hervor. Ist jedoch eine dieser Einflußgrößen besonders stark ausgeprägt, so kann sie gemeinsam mit den beiden anderen vor allem dann einen Riß auslösen, wenn der Beton gegenüber dieser Beanspruchungsart wenig zweckmäßig zusammengesetzt oder behandelt worden ist.

Im folgenden soll der Wirkungsmechanismus dieser drei potentiellen Ursachen für Zwängungsspannungen und dadurch Risse in jungem Beton erläutert werden. Soweit dies nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse möglich ist, werden auch einige Maßnahmen beschrieben, durch die sich entweder die Einwirkungen auf ein unschädliches Maß herabdrücken lassen oder die Widerstandsfähigkeit des Betons hinreichend hoch steigern läßt.

2. Formänderungen der Schalung

Risse infolge Formänderungen oder Setzungen der Schalung, der Schalungsträger oder des Lehrgerüsts treten dann auf, wenn der Beton einerseits diesen Formänderungen nicht mehr plastisch zu folgen vermag, andererseits jedoch noch nicht so weit erhärtet ist, um die aus den Verformungen der Schalung entstehenden Lasten rißfrei zu den Auflagern abtragen zu können. Für die Größe der Formänderungen, die einem erhärteten Beton zugemutet werden können, ist die zum Zeitpunkt der Formänderungen aufnehmbare Dehnung, d. h. die Bruchdehnung, maßgebend.

Ausgehend von der spannungslosen großen Verformbarkeit des grünen Betons nimmt die Bruchdehnung bei kurzzeitiger Zugbeanspruchung innerhalb weniger Stunden je nach Betonzusammensetzung und Umweltbedingungen auf 0,02 bis 0,10 ‰ ab, um im Laufe der Zeit wieder auf 0,1 bis 0,2 ‰ anzusteigen, siehe Bild 4 [2]. Der Zeitraum geringer Verformbarkeit beträgt je nach den Gegebenheiten etwa 2 bis 6 Stunden, der Beginn des Verformungsminimums liegt in der Regel zwischen der 4. und 10. Stunde nach dem Verdichten des Betons. Eine höhere Frischbetontemperatur und langes Mischen des Betons bewirken z. B. einen früheren Eintritt, niedrigere Frischbetontemperatur und ein Feuchthalten der Betonoberfläche dagegen ein späteres Eintreten des Bruch-Dehnungs-Minimums.

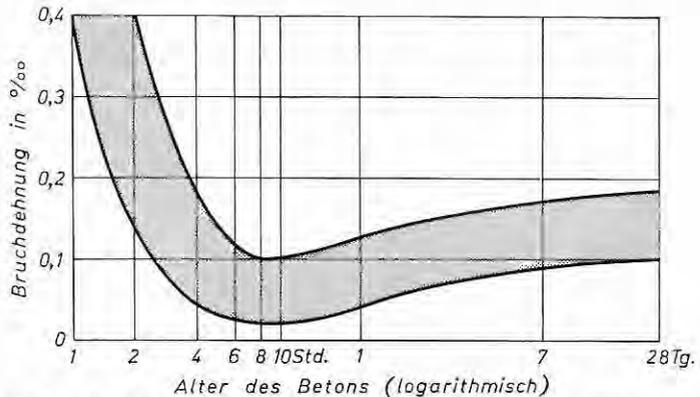


Bild 4 Bruchdehnung von Beton bei Zugbeanspruchung in Abhängigkeit vom Alter [2]

Auch im ungünstigsten Zeitpunkt weist der Beton gemäß Bild 4 noch eine Bruchdehnung von rd. 0,02 ‰ auf. Ausgehend von diesem Wert können die von einem erhärtenden Beton in der Praxis ohne Riß aufnehmbaren Formänderungen aus der Schalung im Einzelfall abgeschätzt werden; so vermag z. B. eine 16 cm dicke Betonplatte bei 6 m Spannweite während des kritischen Bereichs geringer Verformbarkeit nur einer rd. 1 mm großen Durchbiegung mit großer Sicherheit rißfrei zu folgen.

Der Bereich geringer Verformbarkeit muß auch bei der Warmbehandlung von Betonfertigteilen beachtet werden, insbesondere

wenn beispielsweise hierzu eine beheizte Stahlschalung verwendet wird, wie es in Bild 5 schematisch dargestellt ist. Bei der Wärmebehandlung eilen die Temperatur und die Wärmedehnung der steifen Stahlschalung denen des Betons zeitlich voraus. Mit einem RiB muß gerechnet werden, wenn zum Zeitpunkt geringer Verformbarkeit des Betons die Dehnung der Stahlschalung um 0,02 ‰ größer wird als die des Betons, d. h. wenn der dann eintretende Temperaturanstieg der Schalung um rd. 20 grd höher ist als der mittlere Anstieg der Betontemperatur.

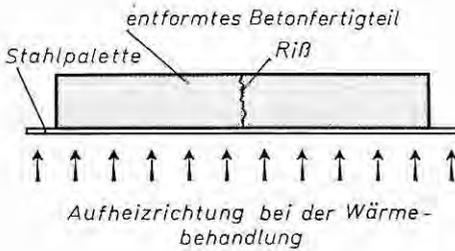


Bild 5
RiBbildung durch Temperaturdehnung der Schalung (schematische Darstellung)

In diesem Zusammenhang soll noch darauf hingewiesen werden, daß schon das Quellen von nicht vorgeätzt ausgetrockneter Holzschalung zu unverträglichen Formänderungen führen kann. Diese Beispiele aus der Praxis zeigen, daß Formänderungen und Setzungen der Schalung in der Größenordnung der verträglichen Verformbarkeit des Betons auf vielfältige Ursachen zurückgehen können. Risse infolge Formänderungen und Setzungen der Schalung und des Lehrgerüsts lassen sich mit Sicherheit vermeiden, wenn die entsprechenden Maßnahmen getroffen werden, die bereits schon seit langem zum Stand der Technik gehören [9, 10].

3. Temperatureinflüsse

Temperaturänderungen können nicht nur indirekt, wie z. B. durch unverträgliche Formänderungen der Schalung bei einer Warmbehandlung von Beton (siehe Abschnitt 2), zu hohen Zwängungs- spannungen führen, sondern sie können auch direkt hohe Eigen- spannungen hervorrufen. In massiven Bauteilen können durch die Hydrationswärme des Zements im Verlauf von Tagen oder Wochen Temperaturspannungen entstehen und zu Schalen- oder Spaltrissen führen [11]. Weil hier nur die Verhältnisse des grünen und jungen Betons bis zu einem Alter von 24 Stunden behandelt werden sollen, wird darauf in diesem Zusammenhang nicht näher eingegangen.

Während Risse bei massigen Bauteilen meist eindeutig auf einen zu hohen Temperaturgradienten zurückzuführen sind, fand sich für Risse in Betonfahrbahnen, die sich in der ersten Nacht nach der Herstellung und meist vor dem Schneiden der Fugen bildeten, längere Zeit keine befriedigende Erklärung. Beobachtungen der Praxis deuten allerdings darauf hin, daß Temperaturspannungen die maßgebliche Ursache für solche Risse sind, weil solche Risse

öfters dann auftreten, wenn einem warmen Tag eine relativ kühle Nacht folgte. Englische und österreichische Untersuchungen über die Temperaturentwicklung in erhärtendem Beton bestätigen, daß Temperaturänderungen an dieser Rißenstehung maßgeblich beteiligt sind [3, 4].

Die im Versuch gemessene Temperaturverteilung an der Plattenoberseite, der Plattenmitte und der Plattenunterseite einer 25 cm dicken Betonfahrbahnplatte, die morgens um 8 Uhr an einem sonnigen Frühsommertag hergestellt und dann mit einer hellpigmentierten Folie abgedeckt wurde, zeigt Bild 6 [3]. Ausgehend von einer Frischbetontemperatur von 20 °C entwickelten sich die Temperaturen in den einzelnen Bereichen der Platte sehr unterschiedlich. Im oberen Bereich erwärmte sich der Frischbeton zunächst durch die Sonneneinstrahlung. Der Temperaturanstieg durch die Sonneneinstrahlung hängt sehr stark von der Absorptionsefähigkeit der Betonoberfläche ab. Während sich bei der mit einer hellpigmentierten Folie abgedeckten Oberfläche gemäß Bild 6 ein Temperaturanstieg bis zur vierten Stunde nach dem Einbringen – also etwa um 12 Uhr – von rd. 7 grd ergab, kann der Temperaturanstieg einer ungeschützten Betonoberfläche bis zu 15 grd betragen. Der Temperaturanstieg bei Abdeckung mit einer durchscheinenden Folie wird noch über 10 grd liegen, während lediglich der Temperaturanstieg unter einem Zeltdach sehr gering ist. Dieser erste Temperaturanstieg bei sonnigem Wetter im oberen Bereich der Platte führt zwar zur Volumenvergrößerung des Betons, nicht jedoch aber zu inneren Spannungen, da der Beton allen Volumenänderungen im plastischen Zustand spannungsfrei zu folgen vermag. Während die Temperatur der Oberfläche der Betonplatte von der Sonneneinstrahlung und den Schutzmaßnahmen sehr stark abhängig ist, ist der Einfluß in Plattenmitte schon merklich kleiner, und die Temperatur an der Plattenunterseite bleibt hiervon nahezu unbeeinflusst. Wenn mit der Erhärtung eine verstärkte Entwicklung der Hydratationswärme erfolgt, steigt

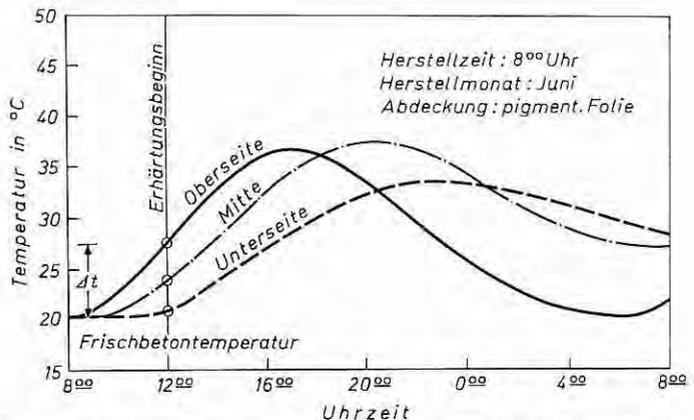


Bild 6 Temperaturentwicklung innerhalb einer Betonfahrbahnplatte bei mäßiger Sonneneinstrahlung [3]

im ganzen Plattenbereich die Temperatur nahezu gleichmäßig an (siehe Bild 6). Die Temperatur durchläuft in den einzelnen Bereichen der Platte ein zeitlich verschobenes Maximum, wenn die Wärmeabgabe an die Umgebung durch die weiterhin entstehende Hydratationswärme nicht mehr ausgeglichen werden kann.

Dieser auch für andere im Freien hergestellte Betonplatten charakteristische Temperaturverlauf ist nahezu unabhängig von der Betonzusammensetzung, insbesondere vom Zementgehalt und von der Art der Zuschläge, von der Plattendicke und von der Frischbetontemperatur. Größeren Einfluß haben die Jahreszeit und die Tageszeit sowie die Absorptionsfähigkeit der Betonoberfläche. Betone, die in den ersten Stunden vor Sonneneinstrahlung geschützt sind, sei es durch eine zeltartige Abdeckung, sei es, daß sie im Herbst oder am Nachmittag hergestellt wurden, zeigen einen wesentlich anderen Temperaturverlauf. Die Ausschläge in der Temperaturverlauf sind bei weitem nicht so groß, und die Maxima des Temperaturverlaufs in den einzelnen Plattenzonen fallen nahezu zusammen.

Jede Temperaturänderung hat durch die Wärmedehnung eine Volumenänderung zur Folge, die der grüne Beton wegen seiner Verformbarkeit spannungsfrei mitmachen kann. Das ändert sich vom Zeitpunkt des Erstarrens an. Temperaturänderungen, die danach auftreten, rufen Zwängungsspannungen hervor. Für die Größe der Spannungen und deren Berechnungen sind also nicht die gesamten Temperaturänderungen maßgebend, sondern nur diejenigen, die nach dem Beginn des Erhärtens eintreten. Diejenige Temperaturverteilung, die bei Beginn des Erhärtens vorliegt und der ein spannungsfreier Zustand zuzuordnen ist, muß der Ausgangspunkt für weitere Überlegungen oder Berechnungen sein.

Temperaturänderungen nach dem Erstarren rufen auf zwei verschiedenartigen Wegen Zwängungsspannungen hervor. Ändert sich bei konstanter mittlerer Plattentemperatur nur die Temperatur über dem Querschnitt, dann will sich die Platte krümmen. Dem wirkt das Eigengewicht entgegen, so daß Biegespannungen entstehen, und zwar an einer sich abkühlenden Seite Zugspannungen und an einer sich aufwärmenden Seite Druckspannungen. Ändert sich die mittlere Plattentemperatur, dann will sich die gesamte Platte bei einem Erwärmen ausdehnen und bei einem Abkühlen zusammenziehen. Dem wirkt die Reibung zwischen Platte und Auflager entgegen, so daß beim Abkühlen Zug- und beim Erwärmen Druckspannungen entstehen. Im allgemeinen liegen solche Temperaturverhältnisse vor, daß aus beiden Gründen Spannungen entstehen, die sich dann überlagern.

Unter der Annahme, daß es sich um eine sehr lange Platte handelt, sind für die Temperaturverhältnisse nach Bild 6 die zugehörigen Spannungen in Bild 7 unter der Annahme aufgetragen worden, daß ein merkbares Erstarren, das also keine zwängungsfreien Verformungen erlaubte, nach etwa vier Stunden begonnen hat. Da die Temperatur infolge Hydratationswärme und Sonneneinstrahlung auch nach dem Erstarren noch weiter anstieg, entstanden zunächst in der Platte überall Druckspannungen. Ein Teil der so entstehenden Druckspannungen wird durch Relaxation des

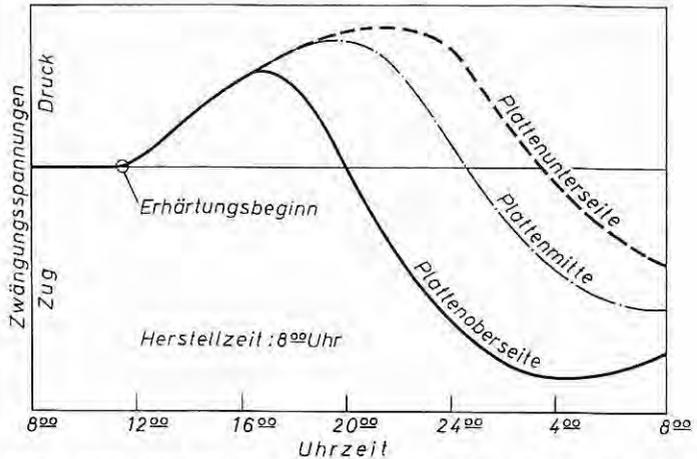


Bild 7 Entwicklung von Zwängungsspannungen innerhalb einer Betonfahrbahnplatte infolge Temperatureinwirkungen

jungen Betons abgebaut. Geht die Sonneneinstrahlung zurück und wird die Wärmeabgabe an die Umwelt größer als die entstehende Wärme aus der Hydratation, dann nehmen die Druckspannungen ab und gehen bei weiterer Abkühlung in Zugspannungen über. An der Plattenoberseite treten entsprechend dem zeitlich früheren Temperaturmaximum auch früher Zugspannungen auf als an der Plattenunterseite. Solche Verhältnisse sind meist gegeben, so daß, wenn überhaupt Risse entstehen, diese von der Plattenoberseite ausgehen und sich zur Plattenmitte fortpflanzen. Bei kleinflächigen Platten entstehen selbst bei gleichen Temperaturverhältnissen wesentlich kleinere Zwängungsspannungen, weil die Reibung bei kleineren Abmessungen leichter überwunden wird und weil sich die Randeinflüsse bis zur Plattenmitte spannungsmindernd auswirken. Daher kommen im Hochbau solche Temperaturvorgänge als alleinige Rißursache praktisch nicht in Frage.

Demgegenüber ist eine solche Gefahr für Betonfahrbahnen in ihrer Längsrichtung durchaus gegeben, insbesondere wenn sie im Herbst oder Frühsommer am Vormittag eines warmen Tages mit Sonnenschein betoniert werden und eine sternklare, relativ kühle Nacht folgt. Die technischen Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton [13] enthalten Angaben, wie solche Temperaturrisse mit Sicherheit vermieden werden können. Hierzu gehören der Einbau des Betons im Schutze eines Zeltes sowie Schutzdächer nach der Herstellung. Um Risse infolge starker Abkühlung in der ersten Nacht zu vermeiden, stehen gleich drei verschiedene Maßnahmen alternativ zur Auswahl, nämlich das Abdecken in der ersten Nacht mit einer wärmedämmenden Schicht, wie z. B. einer Strohmatte, oder Einscheiden der Fugen noch am selben Abend in Fahrbahnen, die am Vormittag betoniert wurden, oder das Einrütteln von Scheinfugen im Abstand von 5 m bei der Herstellung [12, 13, 14].

4. Wasserentzug durch frühzeitiges, schnelles Trocknen

Während im Hochbau Temperaturvorgänge praktisch nicht als alleinige Ursache für Risse in jungem Beton in Frage kommen, können häufig Wind und rel. Feuchte der Luft frühzeitig auf die Betonoberfläche einwirken. Der bei ungünstigen Verhältnissen hierdurch bewirkte Wasserentzug wirkt sich bei den meist weicher eingestellten Betonmischungen des Hochbaus stärker aus als bei dem steiferen Beton der Betonfahrbahndecken. Der höhere Wassergehalt des Betons für den Hochbau wirft die Frage auf, ob Verdunstungsvorgänge oder allgemein ausgedrückt ein Wasserentzug für sich allein als Ursache für eine Ribbildung in jungem Beton in Frage kommen.

Hierauf geben die bisher vorwiegend im Ausland durchgeführten Versuche noch keine eindeutige Antwort [5, 6, 7, 15, 16, 17 u. a.]. Ihre Ergebnisse sind zudem auf deutsche Verhältnisse nur bedingt übertragbar. Zur weiteren Abklärung dieser Frage wurde daher im Forschungsinstitut der Zementindustrie durch Versuche der Frage nachgegangen, ob ein starkes Austrocknen des grünen Betons durch trockenen Wind Ursache für jene Art von Rissen in Platten aus jungem Beton sein könnte, die man im allgemeinen Sprachgebrauch häufig als „Schrumpfrisse“ bezeichnet. Wesentlich zutreffender werden diese Risse im angelsächsischen Sprachraum [15] als „plastic shrinkage cracks“ bezeichnet, was man mit „Schwindrisse im plastischen Zustand“ übersetzen könnte. Es gibt auch Vorschläge, die durch Austrocknen in jungem Beton entstandenen Risse als „Trocknungsrisse“ oder „Windrisse“ zu bezeichnen.

4.1 Versuchsprogramm und Ausgangsstoffe

Um den Versuchsaufwand zu begrenzen und dennoch eine Vielzahl wichtiger Einflüsse untersuchen zu können, wurden alle Einflußgrößen konstantgehalten, die zwar auf das Ribverhalten zum Teil einen wesentlichen Einfluß ausüben können, die jedoch für die Überprüfung der Wirkungsart der untersuchten Einflüsse nur unbedeutend erscheinen, wie z. B. Zementart und Festigkeitsklasse, Mischvorgang, Mehlkorngelalt sowie Art und Größtkorn des Zuschlags.

Für die Hauptversuche wurde als Zement handelsüblicher PZ 350 F, dessen Eigenschaften nach DIN 1164 in Tafel 1 angegeben sind, verwendet. Als Zuschlag wurde Rheinkies sand mit einem Größtkorn von 8 mm gewählt, dessen Kornzusammensetzung etwa der Sieblinie C 8 entsprach. Der Zementgehalt betrug 270 bzw. 360 kg/m³, der Mehlkorngelalt stets rd. 670 kg/m³ Beton. Der Frischbeton wurde in einem Teller mischer (Zwangsmischer) bei einer Mischdauer von 2 bis 3 min hergestellt. Zusatzmittel wurden den untersuchten Betonen nicht zugegeben.

Verändert wurden als Einflußgröße die Umweltbedingungen (Windgeschwindigkeit, rel. Feuchte, Temperatur), die Frischbeton-temperatur, die Art der mehlfine n Stoffe und die Nachbehandlung. Der Einfluß des Windes wurde dadurch erfaßt, daß sowohl Versuche bei Windstille (Windgeschwindigkeit 0 m/s) als auch bei einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s (etwa Windstärke 3 nach

platten ohne Nachbehandlung als auch Versuchsplatten mit einem aufgespritzten Nachbehandlungsfilm erhärteten.

Da eine vollständige Kombination aller genannten Einflußgrößen zu einem undurchführbar großen Versuchsumfang geführt hätte, wurden bei den einzelnen Versuchsreihen im allgemeinen die nicht untersuchten Einflußgrößen konstant auf einer Stufe gehalten. In den Versuchsreihen 1 bis 3 wurde der Windeinfluß sowie der Einfluß der Temperatur und der rel. Feuchte der Umgebungsluft untersucht. In den Versuchsreihen 4 und 5 wurde der Auswirkung der Frischbetontemperatur und dem Einfluß unterschiedlicher Zusatzstoffe auf die Rißbildung nachgegangen. Für diese Versuche wurden folgende Umweltbedingungen gewählt: 5 m/s Windgeschwindigkeit, 40 % rel. Feuchte und 30 °C Lufttemperatur. Solche Klimabedingungen sind in Deutschland zwar außergewöhnlich, kommen jedoch vor; sie stellen somit zwar eine scharfe, aber keine unangemessen überzogene Beanspruchung dar. Die Auswirkung einer fehlenden Nachbehandlung im Gegensatz zu einer wirksamen Nachbehandlung wurde in der Versuchsreihe 6 untersucht. Weitere Einzelheiten zu den einzelnen Versuchsreihen sind aus Tafel 2 zu ersehen.

4.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Nach verschiedenen Vorversuchen erwiesen sich 8 cm dicke Versuchsplatten von 160 cm Länge und 60 cm Breite als besonders geeignet. Die Platten wurden in einer Stahlform hergestellt, siehe Bild 8. Auf den mit Blech ausgekleideten Boden wurde ein Stahlrahmen aus U-Stahl aufgesetzt, die Fuge zwischen Rahmen und Boden wurde mit einem Gummistreifen abgedichtet. An die Innenseite des Rahmens wurde eine Randbewehrung angeschraubt,

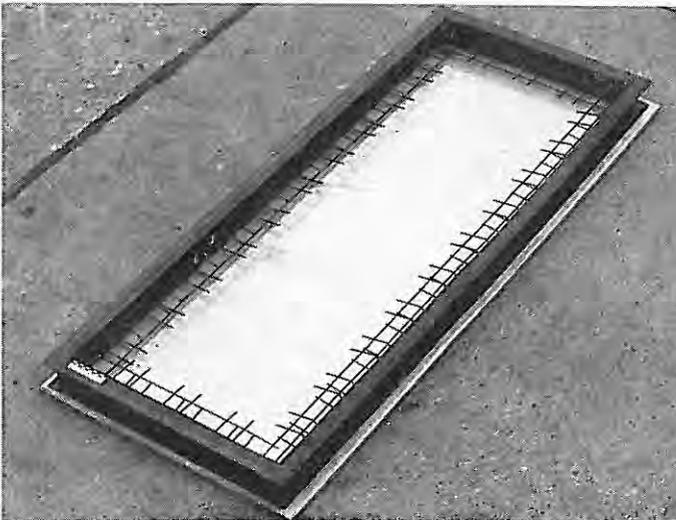


Bild 8 Stahlform für die Herstellung der Versuchsplatten

die eine Ablösung des Betons vom Rand wirksam verhinderte. Als Randbewehrung dienten Abstandshalter für Betonstahlmatten, die nach jedem Versuch erneuert wurden, da sie nach dem Erhärten in den Betonplatten verblieben. Diese Form mit Randbewehrung zwang der untersuchten Probe das Verhalten einer dünnen großflächigen Platte auf. Die einzelne Versuchsplatte stellte gleichsam einen Ausschnitt aus einer üblichen Betondecke des Hochbaus dar.

Die Versuchsplatten wurden in einer Klimakammer hergestellt, in der Temperatur und rel. Feuchte der Umgebungsluft konstantgehalten werden konnten. Zusätzlich wurden die Versuchsplatten mit einem durchsichtigen Windkanal abgedeckt, in dem ein nahezu gleichmäßiger Wind mit einer Geschwindigkeit von rd. 5 m/s mit einem Ventilator erzeugt werden konnte, siehe Bild 9. Die Versuchsplatten wurden von der Herstellung fortlaufend nach Augenschein beobachtet, bis entweder die Ribbildung abgeschlossen oder keine Ribbildung mehr zu erwarten war.

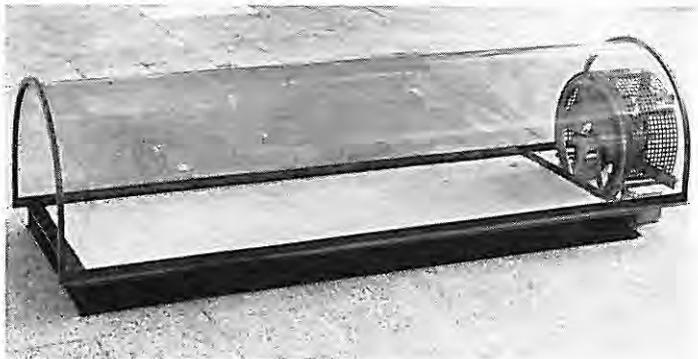


Bild 9 Versuchsplatte bei der Prüfung im Windkanal

Wenn überhaupt, so traten Risse im allgemeinen 2 bis 5 Stunden nach dem Einbringen des Betons auf, meist zu dem Zeitpunkt, zu dem das auf der Betonoberfläche abgesonderte Wasser verschwunden war. Während sich die Risse bildeten, konnte man die Betonoberflächen mit leichtem Fingerdruck meist noch verformen; durch eine nachträgliche Verdichtung konnten die Risse wieder geschlossen werden. An gesondert hergestellten, unter gleichen Bedingungen gelagerten Probekörpern war eine Festigkeit zu diesem Zeitpunkt noch nicht nachweisbar. Die Risse verliefen in der Regel geradlinig quer zur Plattenlängsachse und entwickelten sich meist in einer relativ kurzen Zeitspanne innerhalb von 5 bis 20 min. In den Bildern 10 bis 13 sowie in den Bildern 17 und 19 sind die Risse auf der Platte zur besseren Anschaulichkeit nachgezogen worden.

Auf den einzelnen Versuchsplatten bildeten sich zwischen 1 und 5 Risse. Eine Auswertung der Versuche nach Anzahl der Risse

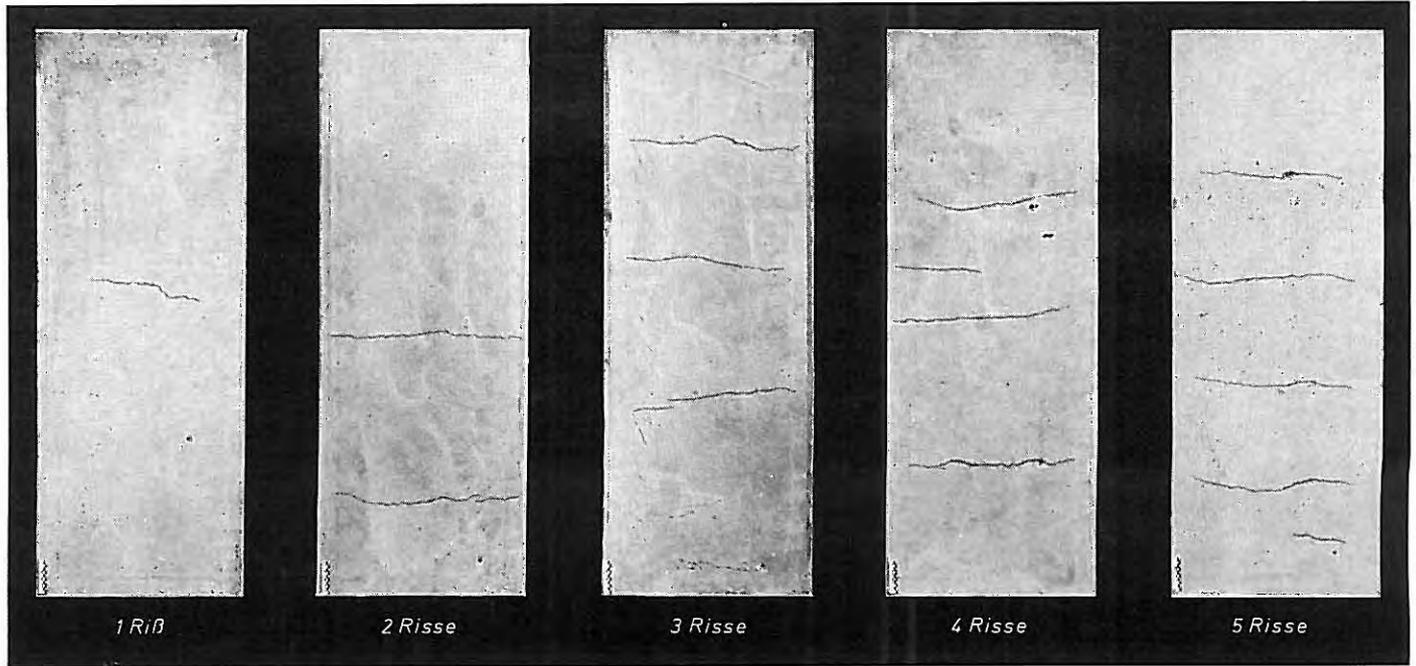


Bild 10 Unterschiedliche Rißausbildung bei einer Versuchswiederholung (Versuch Nr. 2 der Versuchsreihe 1 nach Tafel 2)

oder Rißbreite war wegen mangelnder Reproduzierbarkeit leider nicht möglich. Bei gleichen Versuchsbedingungen – soweit das mit den zur Verfügung stehenden Mitteln beurteilt werden konnte – ergaben sich sowohl Versuchsplatten mit breiten als auch mit schmalen Rissen und sowohl mit einem Riß als auch mit mehreren Rissen, siehe Bild 10. Auch die Summe der Rißweiten einer Platte war unterschiedlich, obwohl eine Tendenz zu entweder mehreren Rissen mit kleinerer Rißweite oder zu einzelnen Rissen mit größerer Rißweite zu erkennen war.

In den meisten Fällen wurde daher nur eine Ja/Nein-Beurteilung nach „gerissen“ oder „nicht gerissen“ vorgenommen und damit auf eine graduelle Abstufung verzichtet (siehe Tafel 2, letzte Spalte). Bei der an sich guten Kontrolle der Versuchsbedingungen weist die mäßige Reproduzierbarkeit im übrigen darauf hin, daß kleine, mit gewöhnlichen Mitteln kaum wahrnehmbare Änderungen schon entscheidenden Einfluß auf das Entstehen solcher Risse nehmen können.

4.3 Einfluß der Umweltbedingungen und der Frischbetontemperatur

Von den drei Umwelteinflüssen Windgeschwindigkeit, rel. Luftfeuchte und Lufttemperatur beeinflußt die Windgeschwindigkeit das Verhalten der Platten am nachhaltigsten. Versuchsplatten, die bei Windstille erhärteten, zeigten überhaupt keine Risse (siehe Tafel 2, Versuchsreihe 1). Einen fast ebenso ausgeprägten Einfluß auf das Rißverhalten besaß auch die rel. Luftfeuchte (Versuchsreihe 2). Bild 11 zeigt Versuchsplatten aus dieser Versuchsreihe, die bei unterschiedlichen rel. Luftfeuchten erhärteten. Während bei der üblichen Lagerung – 5 m/sec Windgeschwindigkeit, 30 °C Lufttemperatur und 40 % rel. Feuchte – alle Versuchsplatten Risse aufwiesen, ging die Rißanfälligkeit bei einem Anstieg der rel. Luftfeuchte auf 50 % auf etwa die Hälfte zurück, und bereits bei einer rel. Luftfeuchte von 65 % entstanden keine Risse mehr. Einen bemerkenswert niedrigen Einfluß auf das Entstehen von Rissen hatte dagegen die Lufttemperatur, siehe Bild 12 (Versuchsreihe 3). Sowohl bei einer Lufttemperatur von 10 und 15 °C als auch bei einer Lufttemperatur von 20 und 30 °C bildeten sich bei sonst praktisch gleichbleibenden Verhältnissen Risse. Unterschiedlich war in dieser Versuchsreihe lediglich das zeitliche Auftreten der Rißbildung. Mit abnehmender Lufttemperatur setzte die Rißbildung immer später ein.

Einen ähnlichen Einfluß wie die Temperatur der umgebenden Luft hatte auch die Frischbetontemperatur (Versuchsreihe 4). Bild 13 zeigt die Rißausbildung von Versuchsplatten, deren Frischbetontemperatur bei rd. 20, 30 und 40 °C lag. Je höher die Frischbetontemperatur war, desto früher setzte die Rißbildung ein. Der Zeitpunkt der Rißbildung, der bei einer normalen Frischbetontemperatur in der 4. Stunde lag, verkürzte sich bei erhöhter Frischbetontemperatur beträchtlich.

Der gleichgerichtete Einfluß von Frischbetontemperatur und Temperatur der umgebenden Luft läßt sich dadurch erklären, daß die Verdunstung weitgehend vom Dampfdruckunterschied zwischen der wassergesättigten Betonoberfläche und der umgebenden Luft

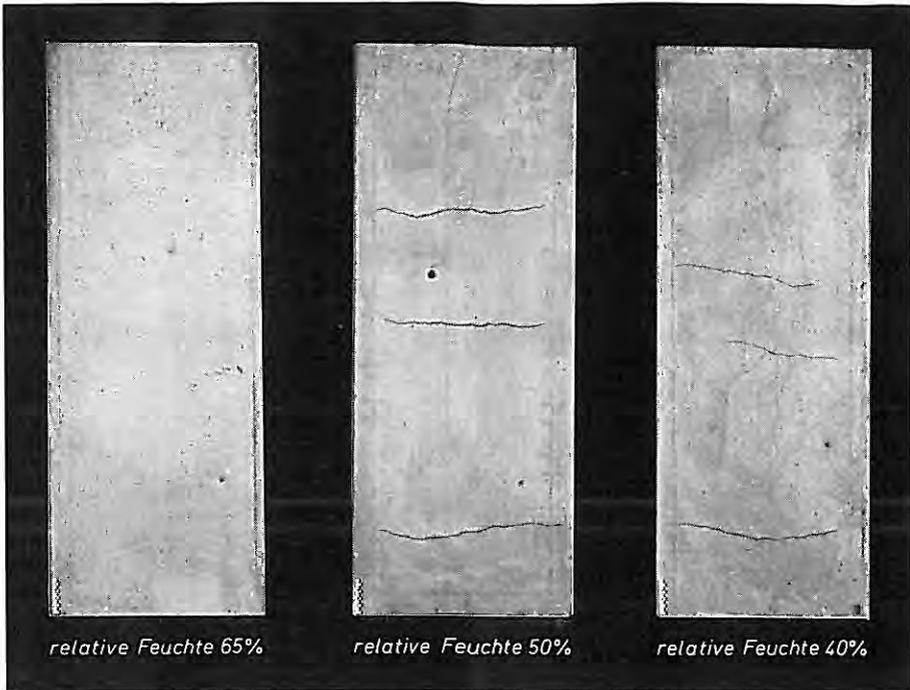


Bild 11 Rißausbildung der Versuchsplatten bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten (Versuchsreihe 2)

bestimmt wird. Der Dampfdruck selbst ist eine Funktion der Temperatur und der rel. Luftfeuchte. Der Dampfdruckunterschied zwischen einer 20 °C warmen Frischbetonoberfläche und einer 10 °C warmen Umgebungsluft mit 55 % rel. Feuchte ist mit rd. 12,5 Torr beispielsweise ebenso groß wie der Dampfdruckunterschied zwischen einem Frischbeton von 26 °C und einer Umgebungsluft von 30 °C und 40 % rel. Luftfeuchte. In beiden Fällen ist die Wasserverdunstung aus der Betonoberfläche anfänglich gleich groß. Die Verdunstung würde jedoch in jedem Fall durch eine schnell sich bildende, mit Wasserdampf angereicherte Luftschicht über dem Beton vermindert werden, wenn nicht ein ständiger Luftstrom dafür Sorge trüge, daß ein gleichbleibender Dampfdruckunterschied zwischen Betonoberfläche und umgebender Luft erhalten bleibt.

Dieser Umstand erklärt auch den besonders großen Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Verdunstung und damit auf das Entstehen von Rissen. Bei Verdunstungsversuchen ergab sich, daß ein Wind mit einer Geschwindigkeit von rd. 5 m/s die Verdunstung bis zum 5fachen Betrag der Verdunstung zu erhöhen vermag, die sich sonst bei Windstille ergeben würde [15]. Während Wind also dazu beiträgt, den Dampfdruckunterschied zwischen Beton und umgebender Luft aufrechtzuerhalten, wird der Dampfdruckunterschied und damit die Ursache für die Verdunstung durch einen

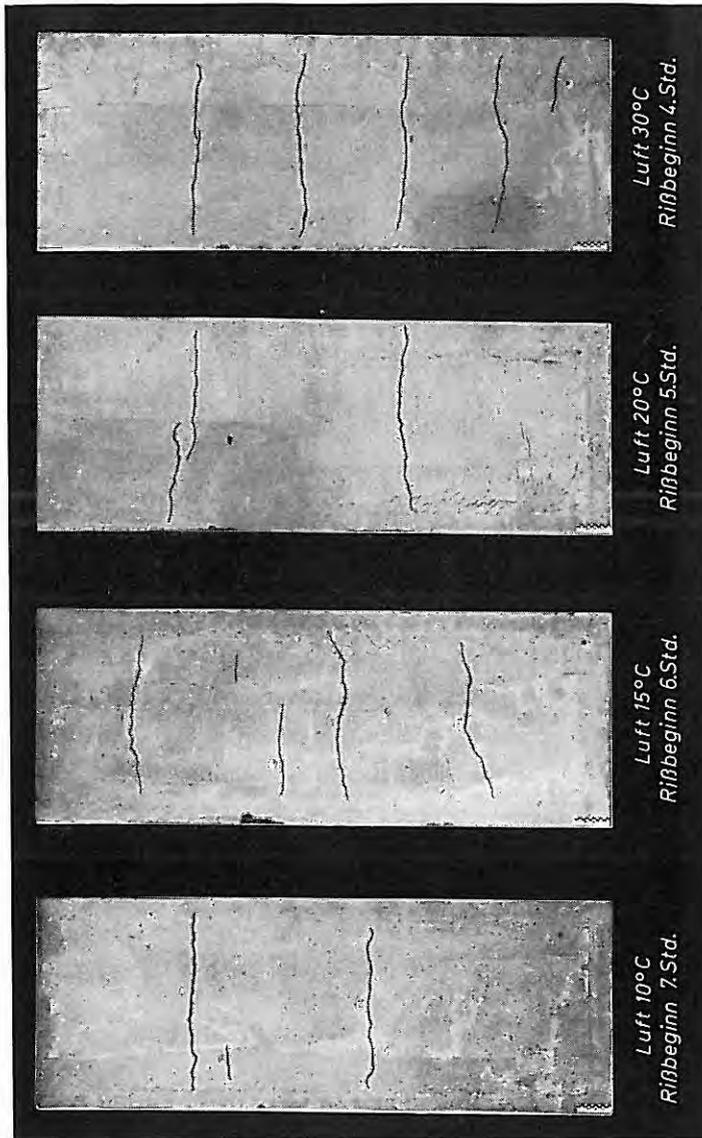


Bild 12 Rißausbildung der Versuchsplatten bei unterschiedlicher Lufttemperatur (Versuchsreihe 3)

Temperaturausgleich zwischen Beton und Umgebungsluft abgebaut. Ein schneller Temperaturausgleich zwischen kälterem Beton und wärmerer Umgebungsluft wird dadurch verhindert, daß dem Beton durch die Verdunstung Wärme entzogen wird; diesem Vorgang wirkt allerdings die Wärmeentwicklung bei der Hydratation wiederum entgegen.

Wie sich diese Vorgänge bei einem mehrfach wiederholten Versuch (Versuch Nr. 2, Versuchsreihe 1) auf die Wasserverdunstung

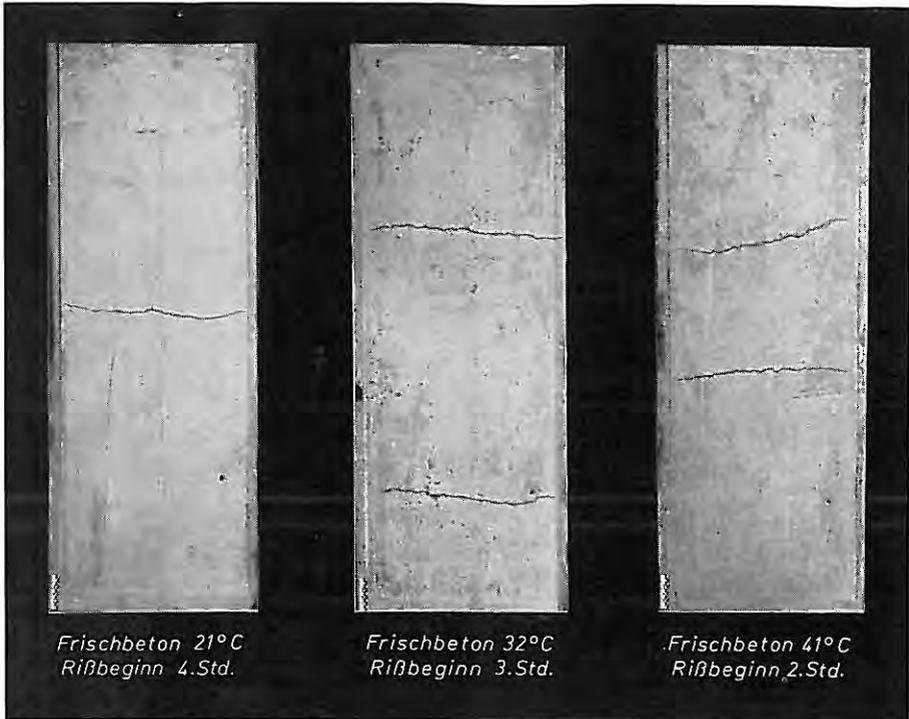


Bild 13 Rißausbildung der Versuchsplatten bei unterschiedlicher Frischbetontemperatur (Versuchsreihe 4)

und die Betontemperatur auswirken, ist aus Bild 14 zu ersehen. Ausgehend von der Frischbetontemperatur von rd. 20 °C steigt die Betontemperatur zunächst rasch an, bis zwischen dem Wärmegewinn aus der wärmeren Luft sowie der Hydratation und dem Wärmeverlust durch die Verdunstung näherungsweise ein Gleichgewicht besteht. Dieses sich nach etwa einer Stunde einstellende Gleichgewicht bleibt näherungsweise bis zum Ablauf der 4. Stunde erhalten. Bis zu diesem Zeitpunkt ist der Beitrag der Hydratationswärme sehr gering, was daraus zu ersehen ist, daß die sich einstellende Temperatur von rd. 22,5 °C der Temperatur einer gleichgelagerten Wasserprobe entspricht. Die sich aufgrund der Umweltverhältnisse einstellende Wasserverdunstung ist beim Beton jedoch keine konstante Größe wie bei der Verdunstung aus einer Wasserfläche, siehe Bild 15.

Bei den in Bild 14 vorliegenden Verhältnissen steigt die Wasserverdunstung entsprechend der anfänglichen Erhöhung der Betontemperatur zwar an, sie klingt aber nach dem Durchlaufen eines flachen Maximums, bei dem die Verdunstung näherungsweise derjenigen einer freien Wasserfläche entspricht, stärker ab. Durch den stärkeren Rückgang der Wasserverdunstung und durch die zunehmende Hydratationswärmeentwicklung beginnt die Beton-

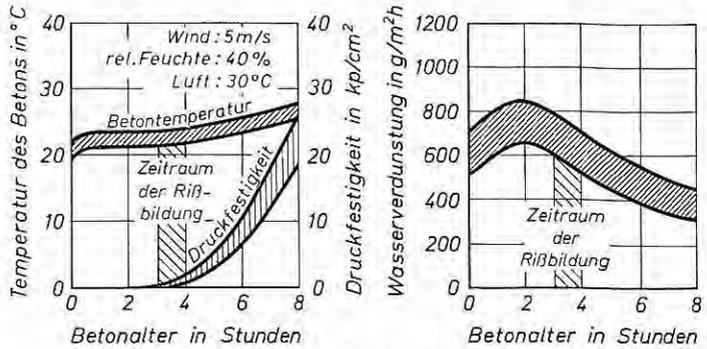


Bild 14 Gegenüberstellung der Entwicklung von Betontemperatur, Wasserverdunstung und Festigkeit (Versuch Nr. 2 der Versuchsreihe 1 nach Tafel 2)

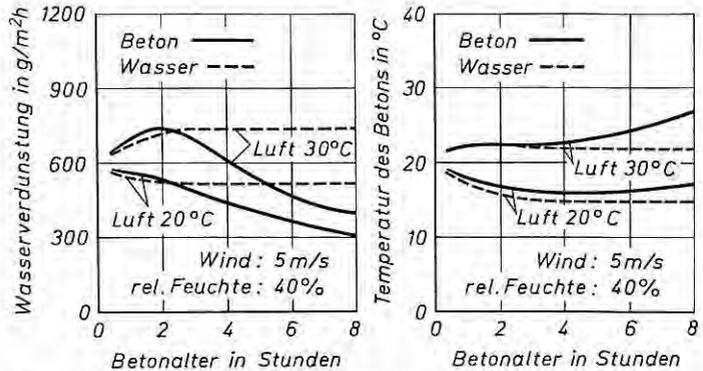


Bild 15 Wasserverdunstung und Temperaturentwicklung von Betonoberflächen und Wasserflächen bei verschiedenen Umweltbedingungen

temperatur anzusteigen und sich der höheren Lufttemperatur anzupassen.

Besonderes Interesse verdient der Temperaturverlauf des Betons im Zusammenhang mit dem Zeitpunkt der Ribbildung. Die Risse bilden sich unmittelbar vor oder nach dem Beginn des Beton-Temperaturanstiegs aus, so daß aus dem Temperaturverlauf der Zeitraum einer etwaigen Ribbildung zu ersehen ist, siehe Bilder 14 und 16. Dieses an sich merkwürdige Verhalten läßt sich aus der Festigkeitsentwicklung des Betons erklären. Der Beginn der Festigkeitsentwicklung ist eng verknüpft mit einer Umwandlung im Betongefüge, bei der sich vermutlich der Zementleim als durchgehende Phase (Matrix) des dispersen Systems „Beton“ von einer Suspension in ein Gel wandelt. In diesem kurzen Zeitraum, in dem die Festigkeit zwar noch sehr gering, die Steifigkeit (Elastizitätsmodul) dagegen schon relativ groß ist, führen schon geringe Zwängungsspannungen zu Rissen, wie sie sich aus der

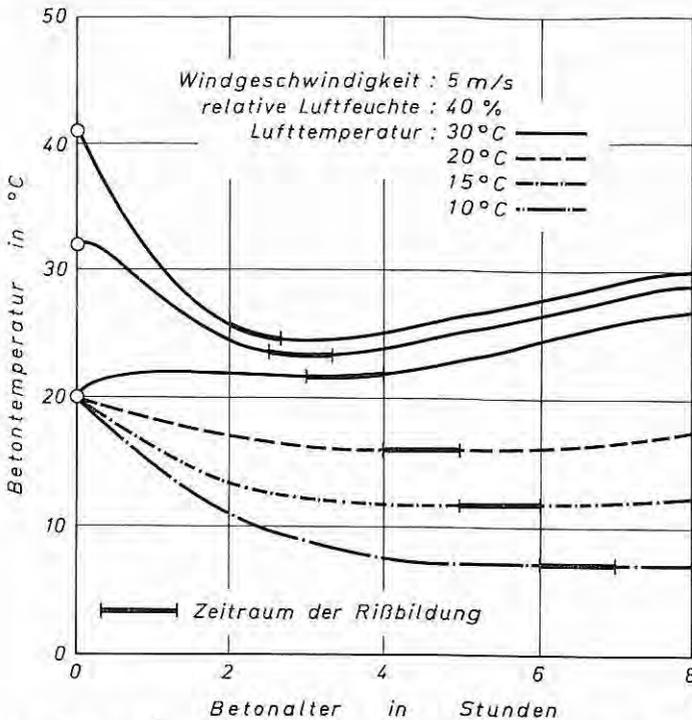


Bild 16 Verlauf der Betontemperatur bei unterschiedlicher Temperatur der Umwelt und des Frischbetons und Zeitraum der Rißbildung

Behinderung von Volumenverminderungen ergeben, die sich durch die Wasserverdunstung bei scharfen Trocknungsbedingungen im Beton ausbilden. Eine hohe Verdunstungsrate stellt somit die wesentliche Voraussetzung für die Rißbildung dar.

Das durch die Hydratation hervorgerufene Schrumpfen – die Verminderung der ursprünglichen Volumina von Wasser und Zement bei der Hydratation – kann dagegen aufgrund der bis zu diesem Zeitpunkt noch am Anfang stehenden Hydratation nur einen sehr geringen Einfluß haben, da der beim Schrumpfen entstehende Porenraum gering ist gegenüber dem Porenraum, der durch die Verdunstung entsteht. Entgegen einer verschiedentlich vertretenen Auffassung scheidet daher das durch chemische Reaktionen bedingte Schrumpfen des Zementleims als maßgebende Ursache für die Risse in jungem Beton praktisch aus.

4.4 Einfluß des Wassergehaltes und der Mehlkornezusammensetzung

Bei den Vorversuchen stellte sich bereits heraus, daß neben den Umweltbedingungen und der Temperatur des Frischbetons auch die Betonzusammensetzung einen bestimmenden Einfluß auf die

Widerstandsfähigkeit von Betonplatten gegen Risse durch frühzeitiges starkes Austrocknen ausübt. Risse zeigten sich bei den gewählten Umweltbedingungen überhaupt nur bei Betonen, deren Wassergehalt wesentlich über 200 l/m^3 Beton lag. Betone, deren Wassergehalt über 250 l/m^3 lag, zeigten sogar eine ausgesprochene Neigung zur Ausbildung solcher Risse. Um die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Rißneigung besser erkennen zu können, wurde bei den Hauptversuchen (Tafel 1) der Wassergehalt des Betons einheitlich auf 270 l/m^3 festgelegt. Betone mit so hohem Wassergehalt setzen ein außergewöhnliches Wasserrückhaltevermögen voraus, was sich nur durch feinkörnigen Zuschlag mit gleichzeitig hohem Mehlkorngesamt oder durch besondere Behandlung des Frischbetons, wie z. B. langes Mischen, erzielen läßt. Da der Einfluß des Mischvorgangs in späteren Versuchen genauer untersucht werden soll, wurden bei den vorliegenden Versuchen alle Betone mit einem gleich hohen Mehlkorngesamt von rd. 670 kg/m^3 hergestellt.

Aufschlußreiche Ergebnisse zum Einfluß der Mehlkorngesamtsetzung und damit zum Einfluß unterschiedlicher Betonzusatzstoffe lieferte Versuchsreihe 5 (Tafel 1). In dieser Versuchsreihe setzte sich der Mehlkorngesamt aus rd. 310 kg/m^3 Feinstsand, der bereits im Zuschlaggemisch enthalten war, sowie 270 kg/m^3 Zement und 90 kg/m^3 Zusatzstoff zusammen. Als Zusatzstoff wurden Traß, Lehm, Flugasche und Quarzmehl verwendet. Ergänzend wurden auch Platten aus Mischungen untersucht, bei denen statt des Zusatzes der Zementgehalt um 90 kg/m^3 auf 360 kg/m^3 angehoben war. Wie bei den gewählten Versuchsbedingungen aufgrund des hohen Wassergehaltes zu erwarten war, rissen die Versuchsplatten mit dem Zusatz von 90 kg/m^3 Traß, Flugasche und Lehm ebenso wie die Versuchsplatten mit dem erhöhten Zementgehalt. Demgegenüber blieb die Versuchsplatte mit dem Quarzmehlzusatz frei von Rissen, siehe Bild 17. Dieses günstige Verhalten des Quarzmehlzusatzes ist darauf zurückzuführen, daß der Beton mit Quarzmehlzusatz extrem stark blutete, weil das Quarzmehl im Vergleich zu den anderen Zusatzstoffen eine deutlich geringere spezifische Oberfläche aufwies. Dadurch verminderte sich der ursprünglich vorhandene Wassergehalt in der Betonmischung sehr. Solange zudem nur auf der Betonoberfläche stehendes Wasser verdunstet, entstehen im Beton keine Volumenverminderungen und Zwängungsspannungen.

Nach diesen Versuchsergebnissen kann zur Steigerung der Widerstandsfähigkeit von Beton gegenüber Rißbildung durch Austrocknen eine Begrenzung des Mehlkorngesamts bzw. der Feinheit des Mehlkorngesamts beitragen. Allerdings können zum Erreichen anderer Betoneigenschaften, wie z. B. guter Pumpfähigkeit des Frischbetons, hoher Wasserundurchlässigkeit des Festbetons oder einer gleichmäßigen Oberfläche von Sichtbeton, bestimmte Anteile von feinem Mehlkorn notwendig sein.

Zur Verminderung des ursprünglichen Wassergehalts und damit zur Verminderung der Rißgefahr kann auch eine Nachverdichtung beitragen. Bei langsamem Betonierfortschritt genügen hierzu unter Umständen schon die Erschütterungen der Schalung und der Bewehrung, die unabsichtlich auf den bereits eingebauten Beton einwirken.

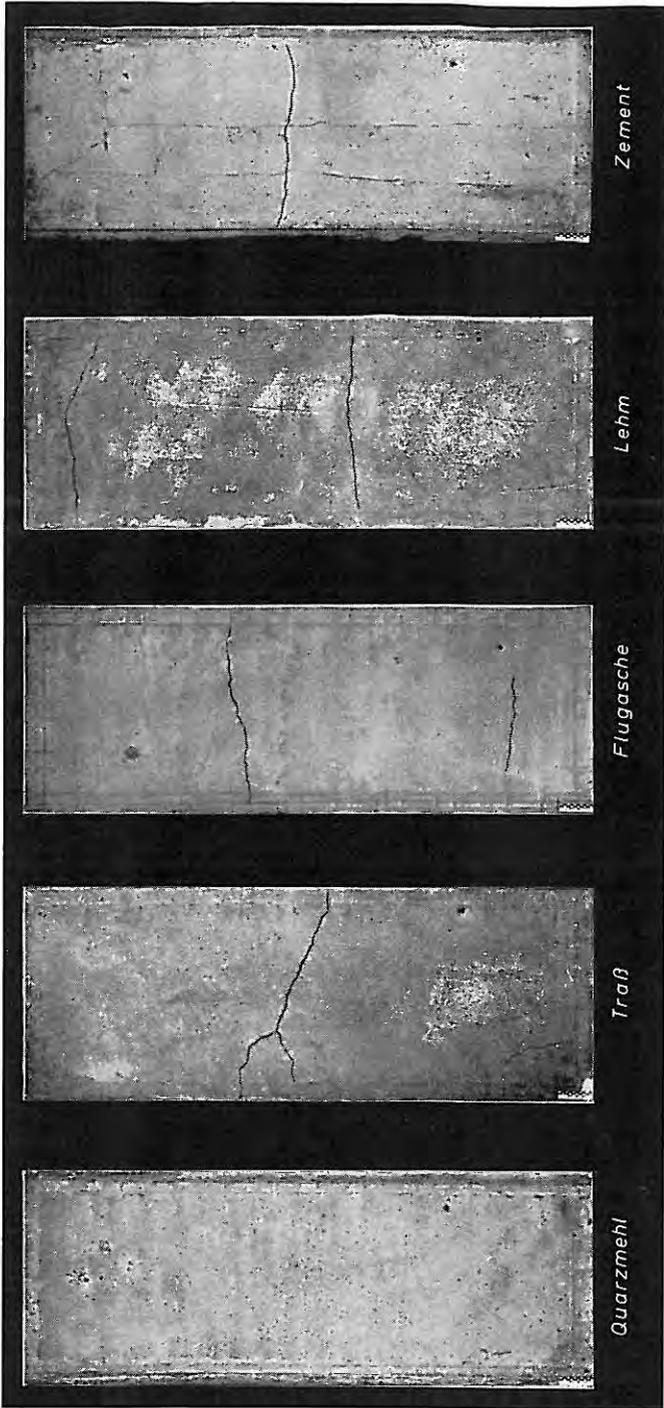


Bild 17 Rißbildung der Versuchsplatten bei unterschiedlichen Betonzusatzstoffen (Versuchsreihe 5)

Voraussetzung für das Entstehen solcher Risse ist also nicht nur ein hoher Wassergehalt des Frischbetons, sondern auch eine Betonzusammensetzung, die ein entsprechend hohes Wasserrückhaltevermögen besitzt, bzw. beim Vorliegen besonderer Bedingungen auch ein so schneller Betonierfortschritt, daß eine „unbeabsichtigte Nachverdichtung“ nicht mehr auftreten kann.

4.5 Einfluß von Zusatzmitteln, Mischvorgang und Zement

Hinsichtlich des Einflusses von Zusatzmitteln auf das Entstehen von Rissen in austrocknendem jungem Beton wurden bislang nur einige orientierende Versuche durchgeführt, so daß eine gesicherte Beurteilung noch nicht möglich ist. Wahrscheinlich wirken sich einige Zusatzmittel günstig aus, mit Sicherheit verschiedene Mittel jedoch ungünstig. So deuten sowohl einige Versuche, die im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt wurden, als auch israelische Versuche darauf hin, daß verzögernde Zusatzmittel einen negativen Einfluß ausüben können [18, 19, 20].

Die Widerstandsfähigkeit des jungen Betons gegen Risse infolge starker Austrocknung wird auch vom Herstellverfahren des Frischbetons beeinflußt. Grundsätzlich fördern alle Maßnahmen, die einen höheren Wasseranspruch und zugleich ein höheres Wasserrückhaltevermögen des Betons bewirken, das Entstehen solcher Risse. Herstellverfahren, wie z. B. das getrennte Mischen des Zementleims in besonders intensiven hochtourigen Mischern, setzen dabei das Wasserabsondern herab, sie erhöhen also das Wasserrückhaltevermögen. In gleicher Weise wirkt ein langes Mischen des Betons. Auch hierdurch wird der für eine bestimmte Verarbeitbarkeit erforderliche Wassergehalt angehoben.

Durch langes Mischen wird die Hydratation des Zements stark angeregt, insbesondere bei hoher Frischbetontemperatur. Beton aus Zementen, die aufgrund ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und hohen Mahlfeinheit vergleichsweise schnell reagieren und dadurch eine besonders hohe Anfangsfestigkeit liefern, kann daher durch langes Mischen bei hohen Frischbetontemperaturen vorzeitig ansteifen. Sofern der Beton ohne weitere Änderung ordnungsgemäß eingebaut wird – was allerdings einen höheren Verdichtungsaufwand erfordert – ergeben sich keinerlei Nachteile; der Beton weist sogar meist eine höhere Festigkeit auf [21]. Wird solchem Beton jedoch nachträglich zur besseren Verarbeitbarkeit Wasser zugegeben, dann entsteht aufgrund des hohen Wassergehaltes und des guten Wasserrückhaltevermögens ein Beton mit einer verminderten Widerstandsfähigkeit gegen Risse durch vorzeitiges scharfes Austrocknen.

Die nachträgliche Wasserzugabe zu Beton, der durch zu langes Mischen angesteift ist, wird in der Praxis gelegentlich auch „Verjüngen“ genannt; es führt im allgemeinen zu einer wesentlich niedrigeren Festigkeitseinbuße als nach dem Wasserzementwertgesetz zu erwarten wäre, siehe Bild 18 [22, 23, 24]. Während die Festigkeitseinbuße durch diese zusätzliche Wasserzugabe meist gering bleibt, kann hierdurch der Wassergehalt auf einen die Ribildung fördernden Wert angehoben werden.

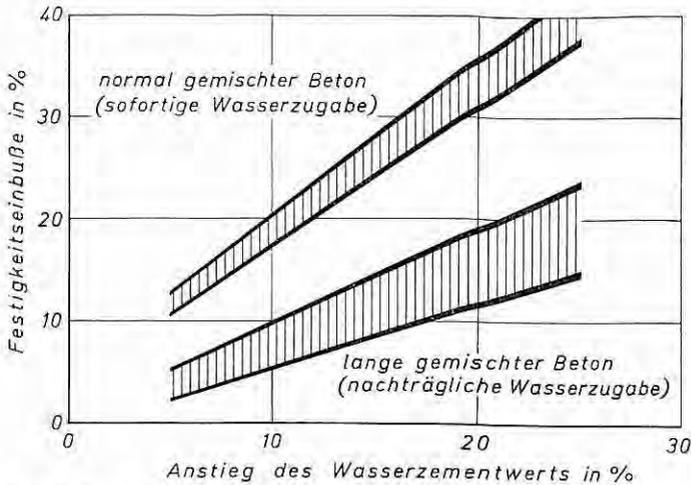


Bild 18 Festigkeitseinbuße bei sofortiger und nachträglicher zusätzlicher Wasserzugabe [22]

4.6 Nachbehandlung

Wenn scharfes Austrocknen die auslösende Ursache für Risse in jungem Beton mit hohem Wassergehalt und hohem Wasserrückhaltevermögen ist, dann liegt die Frage nahe, ob ein hinsichtlich seiner Beschaffenheit ungünstiger Beton selbst bei stark austrocknenden Bedingungen durch eine darauf abgestimmte Nachbehandlung hinreichend geschützt werden kann. Bei einer Nachbehandlung durch Besprühen mit Wasser oder durch Abdecken mit feuchten Tüchern kann dies ohne Nachweis durch Versuche unterstellt werden, weil dadurch ein Austrocknen wirksam unterbunden wird. Versuche (Versuchsreihe 6) wurden jedoch an Betonplatten mit und ohne aufgespritzten Nachbehandlungsfilm durchgeführt, weil Nachbehandlungsfilme das Austrocknen meist nicht vollständig verhindern, sondern lediglich die Austrocknungsgeschwindigkeit stark herabsetzen. Alle Versuchsplatten, die ohne Nachbehandlungsfilm blieben, bekamen Risse, und zwar unabhängig davon, ob der hohe Mehlkorngelalt neben dem Feinstsand im Zuschlag durch einen Lehmzusatz oder durch einen hohen Zementgehalt bewirkt wurde, siehe Bild 19. Selbst bei diesem, hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit gegen solche Risse ungünstig zusammengesetzten Beton (Wassergehalt: 270 l/m³, Mehlkorngelalt; 670 kg/m³) lieferte ein Nachbehandlungsfilm auch bei sehr scharf austrocknenden Bedingungen einen ausreichenden Schutz.

Eine wirksame Nachverdichtung und/oder eine sorgfältige Nachbehandlung stellen somit zwei Maßnahmen dar, mit denen sich die Rißgefahr stark vermindern, wenn nicht sogar vermeiden läßt, auch wenn aufgrund der sonstigen Gegebenheiten, wie z. B. bei stark austrocknenden Umweltbedingungen und bei wasserreichem

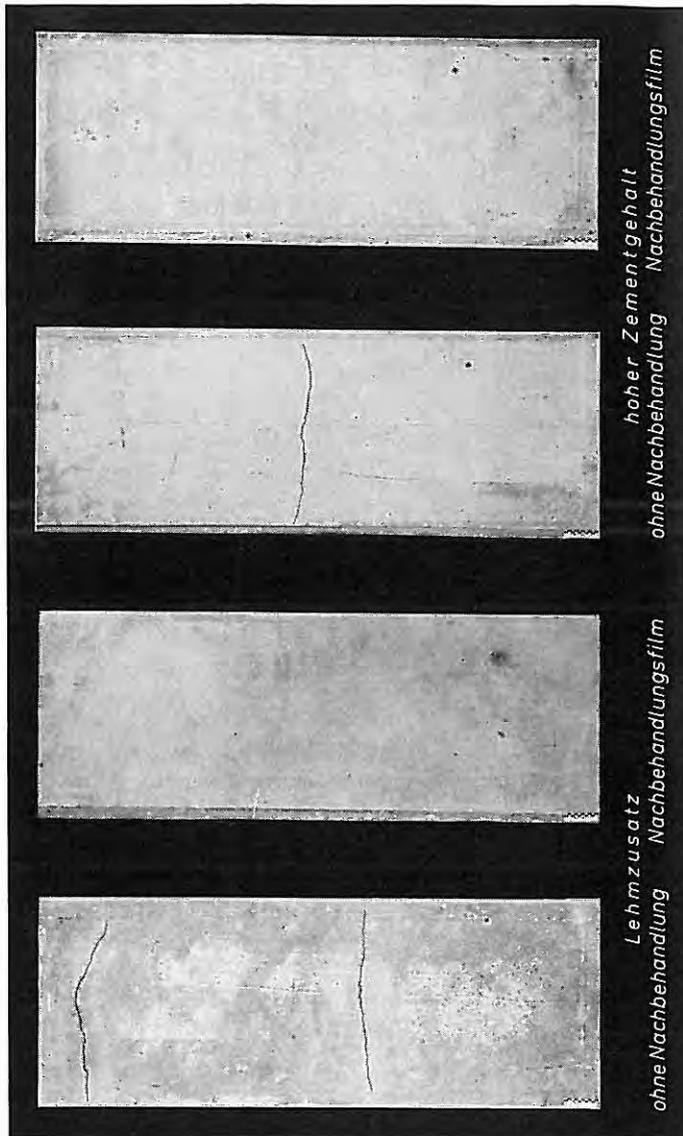


Bild 19 Rißbildung bei Versuchsplatten ohne Nachbehandlung und Rißfreiheit bei Versuchsplatten mit Nachbehandlungsfilm (Versuchsreihe 6)

und wasserhaltendem Frischbeton, eine Rißbildung nicht ausgeschlossen werden kann.

5. Zusammenfassung

Abschließend sollen die bisherigen Kenntnisse über die Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton noch einmal kurz zusammengefaßt werden:

5.1 In der Übergangsphase vom frischen zum festen Beton weist der Beton einen kritischen Zeitbereich mit sehr kleiner Festigkeit und sehr kleiner Verformbarkeit auf, der wenige Stunden nach dem Herstellen – frühestens etwa 2 Stunden nach dem Herstellen – beginnt und etwa 4 bis 16 Stunden dauert. In dem erstarrenden und erhärtenden Beton treten aus inneren und äußeren Gründen immer Zwängungsspannungen auf, die dann zu Rissen führen, wenn ein Zusammentreffen mehrerer Ursachen die Zwängungsspannungen über die nur geringe Festigkeit anhebt.

5.2 Als wesentliche Ursachen für ein stärkeres Anwachsen der Zwängungsspannungen und damit für Risse in jungem Beton haben sich herausgestellt:

- Formänderung der Schalung,
- rasche Änderung der Umwelttemperatur,
- schnelles Austrocknen von wasserreichem Beton.

5.3 Beim Bau von Betonfahrbahnen aus schleifem Beton mit niedrigem Wassergehalt stellen vermutlich die Temperaturänderungen die Hauptursache für Risse in jungem Beton dar. Bei Platten im Hoch- und Ingenieurbau ist vor allem das vorzeitige Austrocknen von wasserreichem Beton für die Ribbildung maßgebend.

5.4 Voraussetzung für Risse durch vorzeitiges Austrocknen und damit ein besonderes Risiko stellt immer ein Beton dar, dessen Wassergehalt über 250 l/m^3 liegt. Das Risiko steigt an, wenn dieser wasserreiche Frischbeton ein ausgeprägtes Wasserrückhaltevermögen, also eine geringe Neigung zum Bluten aufweist. Dabei scheint es ohne Bedeutung zu sein, ob der hohe Wassergehalt und das ausgeprägte Wasserrückhaltevermögen auf die Eigenschaften der Ausgangsstoffe, auf die Betonzusammensetzung oder auf besondere Herstellbedingungen zurückzuführen sind.

5.5 Ein hoher Wassergehalt führt dann zu Rissen, wenn der Beton stark austrocknenden Umweltbedingungen ausgesetzt wird, d. h. wenn bei großem Dampfdruckunterschied zwischen Betonoberfläche und umgebender Luft Wind für die Aufrechterhaltung des Dampfdruckunterschiedes sorgt.

5.6 Kommen zu austrocknenden Umweltbedingungen begrenzte Formänderungen der Schalung oder ungünstige Temperatureinflüsse hinzu, so können auch schon Wassergehalte von 200 bis 250 l/m^3 das Entstehen von Rissen ermöglichen. Wassergehalte unter 200 l/m^3 können nur noch bei ungewöhnlich scharfem Austrocknen, wie es bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s und mehr (Windstärke 4 und höher) und gleichzeitig niedriger relativer Luftfeuchte ausnahmsweise auftreten kann, Anlaß für eine Ribbildung sein.

5.7 Eine frühzeitige Nachbehandlung, wie z. B. durch einen Nachbehandlungsfilm, ist eine wirksame Maßnahme, um Risse in jungem Beton durch Austrocknen zu vermeiden, insbesondere dann, wenn der Beton infolge einer ungünstigen Betonzusammensetzung, eines unsachgemäßen Mischvorgangs oder fehlender Nachverdichtung bei sehr schnellem Betoneinbau besonders „nachbehandlungsbedürftig“ ist.

5.8 Eine Nachverdichtung, die einige Zeit nach dem Wasserentzug stattfindet, kann durch Verdichtung des Betongefüges dem Entstehen von Rissen ebenfalls wirksam entgegenwirken. Hierzu genügen bei langsamem Betonierfortschritt unter Umständen schon die Erschütterungen der Schalung und der Bewehrung, die unabsichtlich auf den schon eingebauten Beton einwirken.

5.9 Trocknungsrisse — häufig unscharf als Schrumpfrisse bezeichnet — können meist unmittelbar nach ihrem Entstehen noch durch eine Nachverdichtung, z. B. einen Oberflächenrüttler, ohne Schädigung der Betonstruktur wieder geschlossen werden.

SCHRIFTTUM

- [1] Wierig, H.-J.: Zur Frage der Theorie und Technologie des grünen Betons. Mitteilungen des Instituts für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens an der Technischen Universität Hannover, H. 196 (1971).
- [2] Wierig, H.-J.: Eigenschaften von „grünem, jungem“ Beton. Druckfestigkeit — Verformungsverhalten — Wasserverdunstung. beton 18 (1968) H. 3, S. 94/101.
- [3] Hunt, J. G.: Temperature changes and thermal cracking in concrete pavements at early ages. Technical Report Nr. 42.460 (1972), Cement and Concrete Association, London.
- [4] Springenschmid, R., und P. Nischer: Untersuchungen über die Ursache von Querrissen im jungen Beton. Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973) H. 9, S. 221/226.
- [5] Ravina, D.: The mechanism of plastic cracking of concrete. Dissertation Technion-Israel Institute of Technology, Haifa 1966.
- [6] Ravina, D., und R. Shalon: Plastic shrinkage cracking. Proc. Amer. Concr. Inst. 65 (1968) S. 282/292.
- [7] Orr, D.M.F.: An apparatus for measuring the shrinkage characteristics of plastic mortars. Magazine of Concr. Research 23 (1971) Nr. 74, S. 43/48.
- [8] Dutron, R., und A. Mommens: Retrait plastique des mortiers et béton frais. Silicales Industrielles 27 (1962) Nr. 7/8, S. 360/369, und Nr. 9, S. 411/418.
- [9] DIN 1045 „Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung (Januar 1972)“, Abschnitt 12. Beuth-Vertrieb, Berlin—Köln.
- [10] Beton-Handbuch; Abschnitt 11. Hrsg. Deutscher Beton-Verein; Bauverlag, Wiesbaden—Berlin 1972.
- [11] Wischers, G.: Betontechnische und konstruktive Maßnahmen gegen Temperaturrisse in massigen Bauteilen. beton 14 (1964) H. 1, S. 22/26, und H. 2, S. 65/75; ebenso Betontechnische Berichte 1964, Beton-Verlag, Düsseldorf 1965, S. 21/58.
- [12] Eisenmann, J.: Bemessung von Zementbetondecken. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, H. 82, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg 1970; ebenso Betonstraßen-Jahrbuch 1969/71, Beton-Verlag, Düsseldorf 1970.
- [13] TV Beton 72 — Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton (Ausgabe 1972). Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln.
- [14] Springenschmid, R.: Versuche und Erfahrungen mit Längs- und Querrissen in Betonfahrbahnen in Österreich. beton 20 (1970) H. 2, S. 47/54.
- [15] Lerch, W.: Plastic shrinkage. Proc. Amer. Concr. Inst. 53 (1957) S. 797/802.

- [16] Abdun-Nur, E. A., F. D. Beresford, F. A. Blakey, M. Spindel und L. H. Tuthill: Discussion of „Plastic shrinkage“ by W. Lerch. Proc. Amer. Concr. Inst. 53 (1957) S. 1341/1346.
- [17] Kreijger, P. C.: Onderzoek naar de scheurvorming in nog niet verhard beton. Cement (Amsterdam) 21 (1969) Nr. 4, S. 140/144.
- [18] Jaegermann, H. C., und D. Ravina: Effect of some admixtures on early shrinkage and other properties of prolonged-mixed concrete subjected to high evaporation. RILEM-Symposium on admixtures for mortar and concrete, Brüssel 1967. Proceedings Bd. IV (Effect of admixtures on the properties of hardened mortar and concrete), S. 321/350.
- [19] Ravina, D., und R. Shalon: Shrinkage of fresh mortars cast under and exposed to hot dry climate conditions. RILEM-CEMBUREAU-Colloquium on the shrinkage of hydraulic concretes, Madrid 1968. Proceedings Bd. II, Beitrag III-E.
- [20] Shacklock, B. W.: The early shrinkage characteristics of hand-placed concrete. Magazine of Concr. Research 10 (1958) Nr. 28, S. 3/12.
- [21] Wischers, G.: Einfluß langen Mischens oder Lagerns auf die Beton-eigenschaften. beton 13 (1963) H. 1, S. 23/30, und H. 2, S. 88/90; ebenso Betontechnische Berichte 1963, Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 21/52.
- [22] Cook, G. C.: Effect of time of haul on strength and consistency of ready mixed concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 39 (1942/43) S. 413/426.
- [23] Hawkins, M. J.: Concrete retempering studies. Proc. Amer. Concr. Inst. 59 (1962) H. 1, S. 63/72.
- [24] Adams, R. F., P. R. Stodola, D. R. Mitchell, R. D. Gaynor, D. L. Bloem, M. R. Smith und C. A. Vollick: Discussion of „Concrete retempering studies“ by M. J. Hawkins. Proc. Amer. Concr. Inst. 59 (1962) S. 1249/1258.