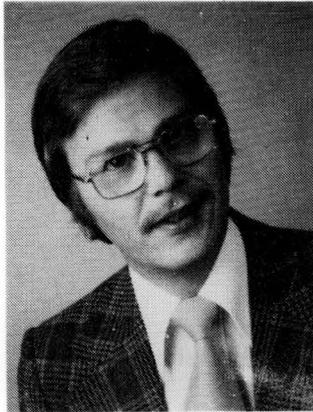


TEMPERATUR- UND DEHNUNGSMESSUNGEN WÄHREND DER ERHÄRTUNGSPHASE DES BETONS

Measurements of Temperatures and Strains During the Hydration Phase of Concrete

Mesures de température et de dilatation pendant la phase de durcissement du béton

Измерение температуры и линейной деформации при растяжении,
во время застывания бетона



Holger Hamfler, Dr.-Ing., Akad. Rat an der Universität Hannover.

Geboren 1949, Studium des Bauingenieurwesens an der Fachhochschule Hamburg 1968 - 1971 und an der Universität Hannover 1971 - 1976. 1976 - 1979 statische und konstruktive Projektbearbeitung bei der Firma Hochtief AG, Abteilung Kerntechnischer Ingenieurbau. Seit 1979 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Universität Hannover.

Dissertation zum Thema "Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach der Methode der Finiten Elemente". Veröffentlichungen und Vorträge über nichtlineare Berechnung von thermischen Beanspruchungen und experimentelle Untersuchungen an Stahlbetonprüfkörpern während der Erhärtungsphase des Betons sowie zu den Nachweisen zur Beschränkung der Rißweite in Stahlbetonbauteilen.

Inhaltsangabe

Temperatur- und Dehnungsmessungen mit begleitenden Laborprüfungen erlauben Rückschlüsse auf die Beanspruchungen in erhärtenden Betonbauteilen, die rechnerisch noch nicht mit ausreichender Genauigkeit erfaßt werden können. Berichtet wird über einige Ergebnisse von Messungen in der Sohlplatte und der Wehrhockerwand des Weserwehrs Bremen, die für das Verhalten dickwandiger Bauteile mit und ohne Zwangsbeanspruchung kennzeichnend sind. Dabei ist die Problematik der Meßwerterfassung und -auswertung bei Messungen während der Hydrationsphase des Betons von besonderer Bedeutung.

Summary

Measurements of temperatures and strains with simultaneous laboratory tests permit conclusions to the thermal stresses arising during hardening of concrete structural members. These stresses cannot be calculated with adequate accuracy. Some results of measurements in the foundation slab and in the overflow wall of the new weir building for the Weser in Bremen are reported, which are characteristic for the behaviour of thick concrete members with and without restraint. Particularly the problematical registration and interpretation of data measured in-situ during the hydration phase of concrete are discussed.

Résumé

Des mesurages de température et de déformation accompagnés de tests en laboratoire permettent des conclusions quant aux chargements pendant la phase de durcissement des blocs de béton, ce qui n'est pas encore possible de mesurer avec exactitude. Certains résultats de mesurages dans la dalle et le seuil du déversoir de Bremen sont décrits, caractéristiques pour le comportement des blocs de béton avec et sans contraintes. Une importance particulière a été donnée aux problèmes d'enregistrement et d'interprétation de mesurages pendant la phase d'hydratation du béton.

Резюме

Измерение температуры и линейной деформации при растяжении совместно с лабораторными опытами позволяют сделать выводы о нагрузках в застывших бетонных элементах, которые ещё не могут быть рассчитаны с достаточной точностью. Кроме того представляются результаты измерений, проведённых в грунтовой плите и стенке водослива Бременской платины на Везере, которые характеризуют поведение толстостенных строительных элементов под и без нагрузки. При этом отлаётся особое значение проблеме сбора и обработки данных измерений во время гидратации бетона.

* Institut für Massivbau, Universität Hannover

INHALT

Seite

1	Problemstellung	69
2	Lage und Aufbau der Meßquerschnitte	69
3	Meßwertaufnehmer	69
3.1	Temperaturmessungen	69
3.2	Dehnungsmessungen im Beton	70
4	Auswertung von Dehnungsmessungen im erhärtenden Beton	71
5	Darstellung und Interpretation der Meßergebnisse	72
6	Zusammenfassung und Ausblick	75
7	Literatur	75

1 Problemstellung

Die beim Abbinden in Betonbauteilen ablaufende exotherme chemische Reaktion des Zements mit dem Anmachwasser führt zu nichtlinearen instationären Temperaturfeldern, die bei größeren Querschnittsabmessungen Maximalwerte von 50 °C bis 60 °C erreichen können. Durch die gleichzeitig ablaufende Erhärtung des Betons mit zunehmender Steifigkeit und abnehmendem Relaxationsvermögen /1/ entstehen in verformungsbehinderten Bauteilen zunächst nur geringe, während der Abkühlungsphase jedoch hohe Zwang- und Eigenspannungen, die beim Erreichen der Betonzugfestigkeit zur Rißbildung führen können. Ausreichend abgesicherte Erkenntnisse über die erforderliche Mindestbewehrung zur Beschränkung der Rißbreiten liegen für dickwandige Bauteile zur Zeit noch nicht vor.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens hat deshalb die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) das Institut für Massivbau der Universität Hannover beauftragt, beim Neubau des Weserwehres Bremen In-situ-Messungen mit Auswertung und Interpretation der Meßergebnisse durchzuführen. Die Untersuchung der Materialeigenschaften wird vom betontechnologischen Labor der BAW durchgeführt. Neben den Lastbeanspruchungen durch Herstellung und Betrieb des Bauwerks soll insbesondere das Verhalten während der Erhärtungsphase des Betons erfaßt werden. Im folgenden wird durch die Darstellung einiger Meßergebnisse in kennzeichnenden Schnitten des Bauwerks auf die Problematik der Meßwerterfassung und -auswertung bei Messungen während der Erhärtungsphase des Betons eingegangen.

2 Lage und Aufbau der Meßquerschnitte

Es wurden in zwei Wehrfeldern insgesamt fünf Meßquerschnitte angeordnet. Mittig im ersten Wehrfeld liegt jeweils ein Meßquerschnitt in der Sohle und im Wehrhöcker (Bild 1). Das zweite Wehrfeld wurde zwischen bereits vorhandene Bauteile betoniert. Die Messungen erfolgten deshalb in den Randbereichen zu angrenzenden Feldern sowie in Sohlplattenmitte.

Mit sieben über den Querschnitt verteilten Thermoelementen wird die Temperaturverteilung registriert. Zwei weitere Meßstellen erfassen die Umgebungstemperaturen.

Acht Dehnungsaufnehmer sind kreuzweise, gleichmäßig über den Querschnitt verteilt und parallel zur Bauteiloberfläche angeordnet. In jeweils gleicher Lage ist eine Temperaturmeßstelle vorhanden. Im zweiten Wehrfeld wurden auch Dehnungsmeßstreifen auf der Bewehrung appliziert. Durch Leerrohre verlaufen die Meßleitungen zu einem Verteilerkasten im Bereich des Wehrhöckers. Über Hauptmeßkabel erfolgt der Anschluß an die außerhalb der Baugrube angeordnete Vielstellenmeßanlage mit automatischer Meßwertregistrierung.

3 Meßwertaufnehmer

3.1 Temperaturmessungen

Für die Temperaturmessungen wurden Widerstandsthermoelemente PT100 verwendet, die zum Schutz gegen meßwertverfälschende Feuchtigkeitseinwirkung sowie gegen mechanische Beschädigung bei der Installation und dem Betoniervorgang in Messinghülsen eingegossen sind. Registriert wird die temperaturbedingte elektrische Widerstandsänderung des PT100 mit Hilfe einer Wheatstoneschen Brückenschaltung. Durch die Kalibrierung der Aufnehmer im Wärmeschrank bei Temperaturen zwischen 20 °C und 60 °C konnten die bauartbedingten Einflüsse, die sich auf den elektrischen Widerstand auswirken, z. B. Lötstellen, Kabellängen und Nichtlinearität des Temperaturgangs weitestgehend kompensiert werden.

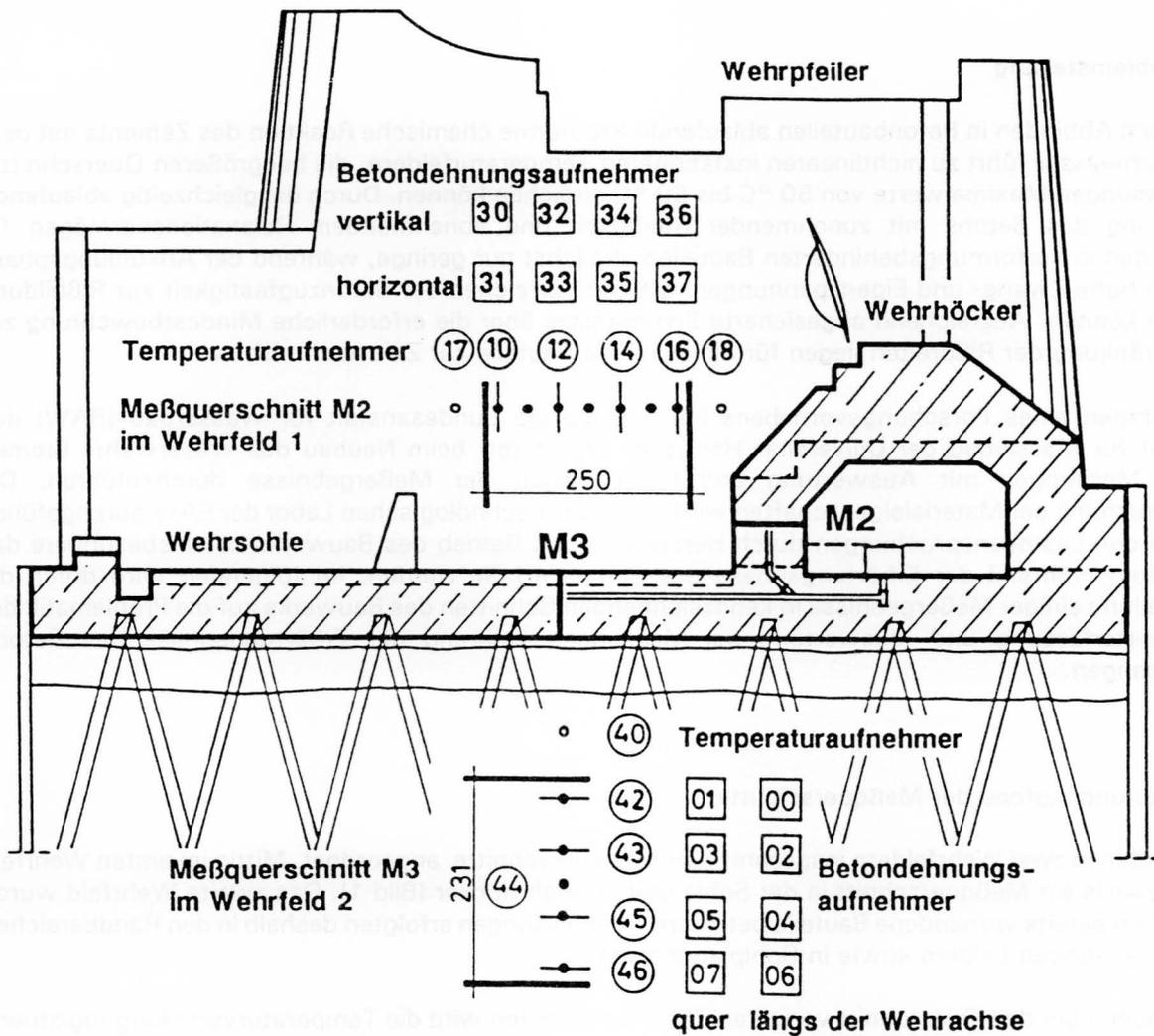


Bild 1 Lage und Aufbau der Meßquerschnitte

3.2 Dehnungsmessungen im Beton

Da eine direkte Messung von Spannungen im ungestörten Beton nicht möglich ist /2/, erfolgt die experimentelle Ermittlung der Beanspruchungen indirekt durch Messung von Auflagerkräften und Lasten bzw. durch Registrierung von Verschiebungen oder Dehnungen, aus denen mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen, bekannter Schnittgrößen-Verschiebungs- oder Spannungs-Dehnungsbeziehungen die gesuchten Spannungen berechnet werden können.

Die Aussagegenauigkeit bei der Ermittlung der Spannungen aus den im Bauwerk gemessenen Dehnungen ist weniger von den Fehlern im Meßsystem, als vielmehr vom Verformungsverhalten des inhomogenen Mehrstoff-Verbundsystems 'Stahlbeton' und den Herstellungsbedingungen des Bauteils abhängig. Wegen der vielen Einflußparameter und Abhängigkeiten aus der betontechnologischen Zusammensetzung des Werkstoffs, dem Betoniervorgang und dem Stoffgesetz ist eine Auswertung der Meßergebnisse zur Berechnung von Spannungen zwangsläufig mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Für Langzeitmessungen sind zwei unterschiedliche Meßverfahren geeignet:

- Maihak-Aufnehmer, die auf dem Verfahren der schwingenden Saite beruhen und eine hohe Langzeitstabilität sowie Unempfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeitseinwirkung aufweisen,

- Betondehnungsaufnehmer 'System Lierse' der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik, bei dem die Dehnung an einem einbetonierten Stahlstab mit Dehnungsmessstreifen nach dem Prinzip der elektrischen Widerstandsänderung registriert wird.

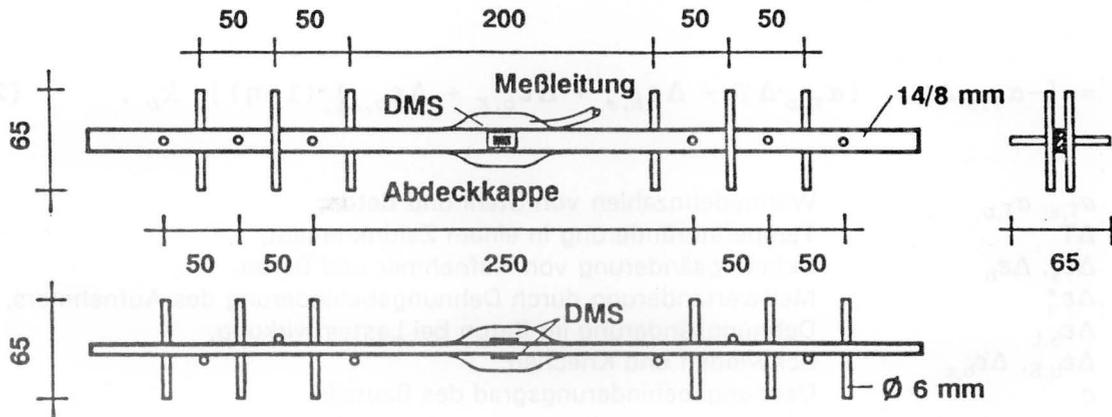


Bild 2 Betondehnungsaufnehmer

Bei den In-situ-Messungen am Weserwehr Bremen wurden letztere verwendet, da sie meßtechnisch mit den gleichzeitig verwendeten Temperatureaufnehmern kompatibel sind und damit die langfristige Vorhaltung unterschiedlicher Meßanlagen vermeidet. Neben geringen Kosten sowie einer hohen Auflösung und Genauigkeit des Meßsignals bieten sie mit ihrer dübelartigen Verankerung (Bild 2) eine weitgehend fehlerfreie Meßwertaufnahme im Zug- und im Druckbereich, die im allgemeinen auch noch bei beginnender Rißbildung gewährleistet ist. Eine Kalibrierung der Aufnehmer erfolgte im Zugversuch und im Wärmeschrank.

4 Auswertung von Dehnungsmessungen im erhärtenden Beton

Durch das zeitabhängige Materialverhalten des Betons während der Hydratationsphase besteht trotz Annahme gleicher Dehnungen kein linearer Zusammenhang zwischen den Spannungen im Dehnungsaufnehmer und im umgebenden Beton. In der ersten Erwärmungsphase eines verformungsbehinderten Bauteils ist der Beton noch weitgehend plastisch. Behinderte Wärmedehnungen des Stahls werden erst mit Beginn der Festigkeitsentwicklung angezeigt. In dieser Phase muß auch noch mit größeren Verformungen im Verankerungsbereich des Aufnehmers gerechnet werden. Bedingt durch die hohe Spannungsrelaxation wird das Maximum der Betondruckspannungen zeitlich vor dem Temperaturmaximum erreicht, während die Stahlspannung mit zunehmender Verbundwirkung nahezu proportional dem Temperaturverlauf folgt. Durch den anwachsenden Elastizitätsmodul und die abnehmende Relaxationsfähigkeit des Betons entstehen bereits kurz nach dem Temperaturmaximum Zugspannungen, die bei Erreichen der Zugfestigkeit zur Rißbildung führen.

In verformungsbehinderten Bauteilen (äußerer Zwang) oder Querschnittsfasern (Eigenspannungen) registrieren die temperaturkompensierten Dehnungsaufnehmer die behinderten Wärmedehnungen des Stahls. Die Meßwerte lassen deshalb direkte Rückschlüsse auf den Beginn der Festigkeitsentwicklung im Beton und die Größe der Dehnungsbehinderung im Bauteil zu. Für die Ermittlung der Betonspannungen aus den gemessenen Dehnungen müssen sowohl das zeitabhängige Materialverhalten, insbesondere die Entwicklung des Elastizitätsmoduls, als auch das Kriech- bzw. Relaxationsverhalten des Betons hinreichend bekannt sein.

Der Zusammenhang zwischen Stahl- und Betondehnung ergibt sich aus den Beziehungen

$$\Delta \varepsilon_s = \alpha_{T,s} \cdot \Delta T + \Delta \varepsilon_s^* \quad , \quad \Delta \varepsilon_b = \Delta \varepsilon_s \quad , \quad (1)$$

$$\Delta \varepsilon_s^* = [-\alpha_{T,s} \cdot \Delta T + (\alpha_{T,b} \cdot \Delta T + \Delta \varepsilon_{b,s} + \Delta \varepsilon_{b,\kappa} + \Delta \varepsilon_{b,L}) \cdot (1-\eta)] \cdot k_b \quad , \quad (2)$$

mit	$\alpha_{T,s}, \alpha_{T,b}$	Wärmedehnzahlen von Stahl und Beton,
	ΔT	Temperaturänderung in einem Zeitinkrement,
	$\Delta \varepsilon_s, \Delta \varepsilon_b$	Dehnungsänderung von Aufnehmer und Beton,
	$\Delta \varepsilon_s^*$	Meßwertänderung durch Dehnungsbehinderung des Aufnehmers,
	$\Delta \varepsilon_{b,L}$	Dehnungsänderung im Beton bei Lasteinwirkung,
	$\Delta \varepsilon_{b,s}, \Delta \varepsilon_{b,\kappa}$	Schwinden und Kriechen,
	η	Dehnungsbehinderungsgrad des Bauteils.

Mit dem Steifigkeitsfaktor k_b läßt sich neben dem elastischen Verhalten von Beton- und Stahlquerschnitt zusätzlich auch eine örtliche Verformung im Bereich der Verankerung berücksichtigen, die durch den Beiwert c_b erfaßt wird:

$$\frac{1}{k_b} = \frac{E_s \cdot A_s}{E_b(t) \cdot A_b} + \frac{E_s \cdot A_s}{c_b(t)} + 1 \quad (3)$$

Wie Langzeitversuche an Prüfkörpern /3/ gezeigt haben, kann dieser Faktor in erhärteten Betonbauteilen mit größeren Querschnittsabmessungen zu $k_b = 1,0$ gesetzt werden, da der Versteifungseffekt des Aufnehmers gering ist ($E_s \cdot A_s \ll E_b \cdot A_b$) und eine nahezu starre Verankerung vorliegt ($c_b \rightarrow \infty$). Auch im erhärtenden Beton beträgt der aus dieser Annahme resultierende Fehler nach einer Anfangsphase von ca. 1 - 2 Tagen nur noch etwa 2 - 3 %, weil der Elastizitätsmodul des Betons durch die temperaturbedingte Beschleunigung des Hydratationsablaufs bereits über 50 % seines Endwertes erreicht.

5 Darstellung und Interpretation der Meßergebnisse

In den Bildern 3 und 4 sind die während der Erhärtungsphase gemessenen Temperaturen und behinderten Dehnungen in zwei Meßquerschnitten (Bild 1) dargestellt, die das unterschiedliche Verhalten der einzelnen Bauteile deutlich machen.

Der erste Betonierabschnitt des Wehrhöckers wurde mit einem Querschnitt von 2,50/2,75 m auf die vorhandene, 2,30 m dicke Wehrsohle betoniert. Der Meßquerschnitt 3 liegt etwa in halber Wandhöhe. Verlauf und Maximalwert der Temperatur sind gekennzeichnet durch den vierseitigen Abfluß der Hydratationswärme. Die in ihrer örtlichen Verteilung über den Querschnitt angegebenen Betonspannungen wurden aus den in Längs- und Vertikalrichtung gemessenen Dehnungen durch Anwendung der Gl. (1) bis (3) inkrementell berechnet. Grundlagen für die Annahmen zum Materialverhalten sind die Gesetzmäßigkeiten des erhärtenden Betons /4/ sowie die Ergebnisse der Laborprüfungen, die von der BAW mit einer dem Bauwerksbeton entsprechenden Betonzusammensetzung durchgeführt wurden.

Eine Überprüfung der im Querschnitt gemessenen Dehnungsdifferenzen zeigt, daß innerhalb des Querschnitts ein Dehnungsbehinderungsgrad $\eta \cong 1,0$ vorliegt. In dem Betonquerschnitt entstehen danach keine Verwölbungen, so daß die Annahme vom Ebenbleiben des Querschnitts auch bei der vorliegenden Querschnittsgeometrie gerechtfertigt ist.

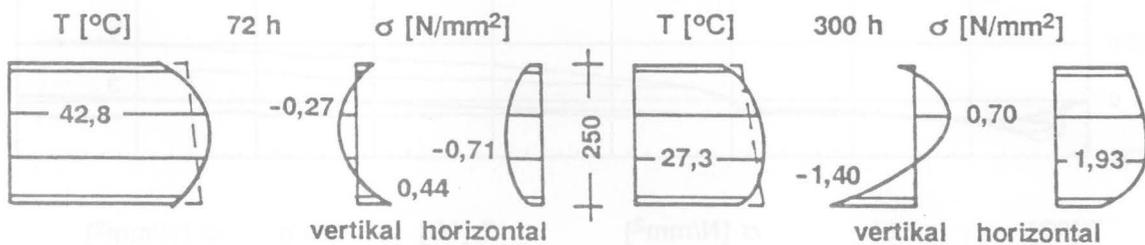
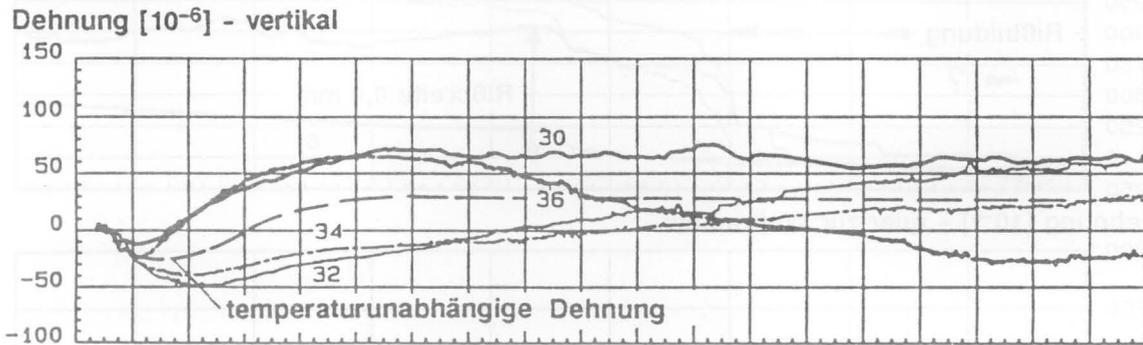
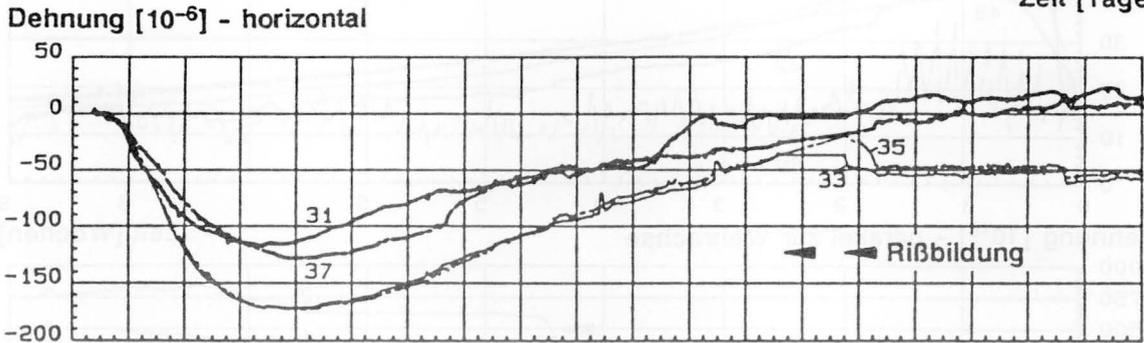
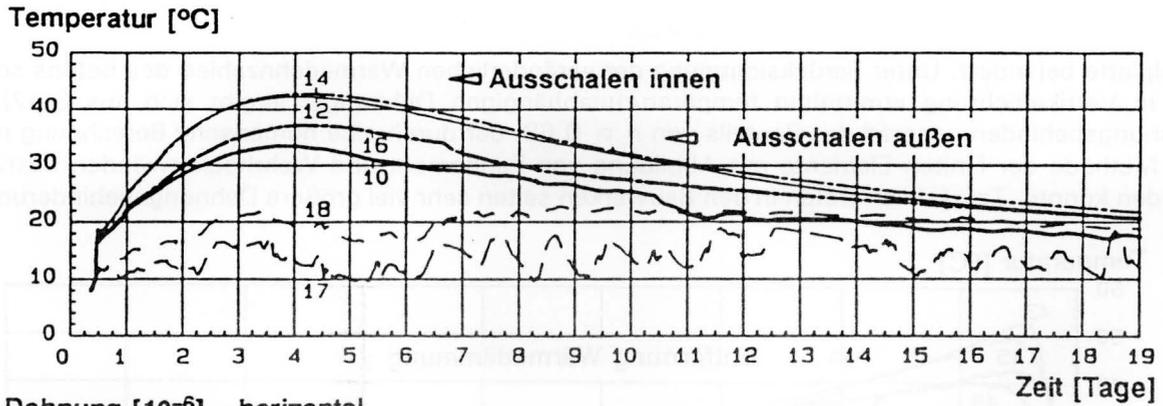


Bild 3 Temperaturen, behinderte Dehnungen der Aufnehmer und ermittelte Spannungen in der Wehrhöckerwand, Meßquerschnitt M2

Die Mittelwerte der behinderten Dehnungen, die bei Annahme gleicher Temperaturdehnzahlen und fehlendem äußeren Zwang $\varepsilon_{s,m}^* \cong 0$ sein müßten, weisen zu Beginn der Erhärtung mit negativen Werten auf Dehnungsdifferenzen zwischen Beton und Stahl hin. Mit zunehmendem Betonalter laufen die weitgehend parallelen Kurven der inneren und äußeren Dehnungen in den positiven Bereich. Dieses Verhalten ist zum Teil auf die veränderliche Wärmedehnzahl, i.W. aber auf das chemisch bedingte Schrumpfen und Treiben des Betons während der Hydratationsphase zurückzuführen /5,6/. Der Verlauf der gemessenen Dehnungen nach Erreichen der Maximaltemperatur wird bestimmt durch das Abkühlverhalten des Bauteils, insbesondere durch die unterschiedlichen Ausschaltzeitpunkte an der Innen- und Außenseite.

In Horizontalrichtung des gleichen Schnittes zeigt sich das Dehnungsverhalten eines zwangbeanspruchten Bauteils. Die thermischen Dehnungen der Wehrhöckerwand werden durch die

Sohlplatte behindert. Unter Berücksichtigung der veränderlichen Wärmedehnzahlen des Betons sowie der in Vertikalrichtung ermittelten temperaturunabhängigen Dehnungen ergibt sich aus Gl.(2) ein Dehnungsbehinderungsgrad des Bauteils von $\eta \cong 0,69$, der durch eine numerische Berechnung nach der Methode der Finiten Elemente mit Abbildung von Fundament und Wehrhöckerwänden bestätigt werden konnte. Tatsächlich treten in den Bauwerken selten sehr viel größere Dehnungsbehinderungen auf.

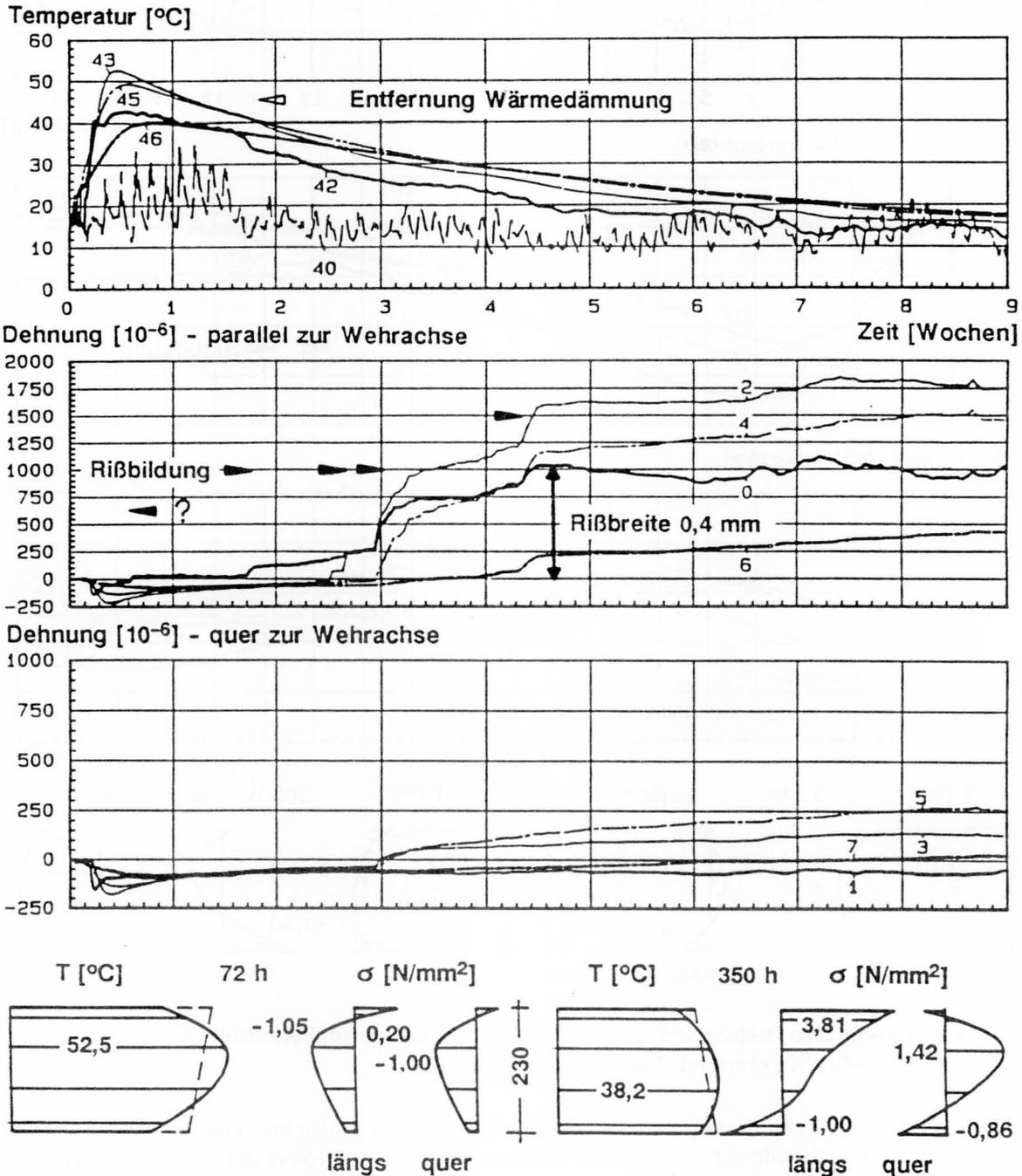


Bild 4 Temperaturen, behinderte Dehnungen der Aufnehmer und ermittelte Spannungen in der Sohlplatte, Meßquerschnitt M3

Wie die Beobachtungen an Bauwerken zeigen, kommt es bei einer nachträglich auf vorhandenem Fundament betonierten Wand häufig zu einer Spaltrißbildung. Obwohl keine volle Dehnungsbehinderung vorliegt, weisen die Betondehnungsaufnehmer im Bauteilinnern deutlich auf eine zunehmende Rißbildung hin, die aber nicht direkt durch den Meßquerschnitt verläuft und bei den Meßwerten der äußeren Dehnungsaufnehmer nicht in Erscheinung tritt. Hier bewirkt die Oberflächenbewehrung eine ausreichende Verteilung und Beschränkung der Rißbreiten.

Die Sohle des zweiten Wehrfeldes ist auf Stahlpfähle gegründet und wurde auf eine 20 bis 30 cm dicke Betonsauberkeitsschicht zwischen Wehrpfeiler und bereits vorhandenem Sohlabschnitt betoniert.

Durch den eindimensionalen Wärmeabfluß treten höhere Kerntemperaturen als in der Wand des Wehrhöckers auf. Die kleineren Meßwerte der Betondehnungsaufnehmer weisen aber auf einen geringeren Behinderungsgrad für zentrischen Zwang hin. Wie die Spannungsprofile zeigen, bewirken hohe Biegezwangbeanspruchungen ein zunehmendes Aufreißen des Querschnitts, das i.W. durch die Verformungsbehinderung der vorhandenen, angrenzenden Bauteile verursacht wird. Die aus den Meßwerten berechnete Rißbreite beträgt in Höhe der oberen Bewehrungslage ca. 0,4 mm.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Beton einbetonierten Dehnungsaufnehmer liefern Aussagen über die Größe der Dehnungsbehinderung und den Beginn der Erhärtung. Bei Rißbildung im Bereich des Meßquerschnittes ermöglichen die Messungen Angaben über die Rißbreite und den Rißfortschritt. Durch numerische Vergleichsrechnungen mit dem in /4/ entwickelten FEM-Programmsystem können weitere Rückschlüsse auf das Verhalten von dickwandigen Bauteilen während der Hydratationsphase gezogen werden.

Insgesamt ergeben sich aus den Temperatur- und Dehnungsmessungen wesentliche Erkenntnisse zur Beurteilung des Beanspruchungszustandes von Betonbauteilen während ihrer Erhärtungsphase.

7 Literatur

- /1/ WIERIG, H.-J.; GOLLASCH, E.: Untersuchungen über das Verformungsverhalten von jungem Beton. In: Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (1982), Heft 47.
- /2/ FLEISCHER, W.: Eigenspannungen in Beton nachweisen. In: Materialprüfung 32 (1990) S.190, Carl Hauser Verlag, München.
- /3/ BIEGER, K.W.; LIERSE, J.: Untersuchungen von Betondehnungsaufnehmern auf der Basis der DMS-Technik hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens. Institut für Massivbau der Universität Hannover, Bericht Nr. 8475, unveröffentlicht.
- /4/ HAMFLER, H.: Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Verschiebungsfeldern in erhärtenden Stahlbetonbauteilen nach der Methode der finiten Elemente. In: DAfStb (1988), Heft 395.
- /5/ NOLTING, H.: Zur Frage der Entwicklung lastunabhängiger Verformungen und Wärmedehnzahlen junger Betone. In: Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (1989), Heft 56.
- /6/ HAMFLER, H.: Experimentelle Untersuchungen an Stahlbetonprüfkörpern während der Erhärtungsphase des Betons. Beitrag zum 21. Forschungskolloquium des DAfStb am 6. und 7.10.1988 in Hannover.

