

# INSTITUT FÜR BAUPHYSIK DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

K. Kießl und K. Gertis

## Berechnung von Temperatur- und Feuchtefeldern in dickwandigen Betonteilen von Reaktorbehältern

### Praktischer Hintergrund

Beim Bau von Spannbeton-Reaktordruckbehältern werden Betonteile von 2 bis 3 m Dicke eingesetzt. Aufgrund des vom Reaktorinneren nach außen bestehenden Temperaturgefälles und des in den Betonporen sorbierten Wassers setzen in solch dickwandigen Betonteilen relativ komplizierte Wärme- und Feuchtetransportvorgänge ein, die thermodynamisch miteinander gekoppelt sind und sich wechselseitig beeinflussen. Die Kenntnis dieser Vorgänge ist für Reaktorbehälter aus festigkeits- und sicherheitstechnischen Gründen von hoher Bedeutung.

### Rechenverfahren

Zur rechnerischen Erfassung der Temperatur- und Feuchtefelder in dickwandigen Betonteilen, die ohne Angabe der feuchtetechnischen Baustoffeigenschaften und Übergangsbedingungen auch bereits von [1] angegangen wurde, ist im Institut für Bauphysik ein Rechenverfahren entwickelt worden. Wie ein im folgenden näher aufgezeigter Vergleich mit Meßergebnissen der Bundesanstalt für Materialprüfung bestätigt [2] [3], gestattet das Rechenverfahren mit einer relativ hohen Genauigkeit, die beim Reaktorbetrieb auftretenden Wärme- und Feuchteverlagerungen in den Betonteilen vorherzubestimmen. Bei dem entwickelten Berechnungsverfahren werden folgende Parameter besonders berücksichtigt:

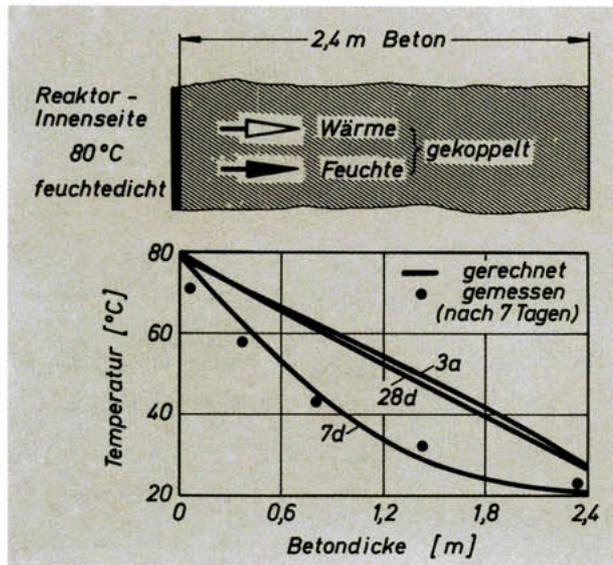
- Die temperatur- und konzentrationsabhängigen Stoffwerte des Betons.
- Die temperatur- und konzentrationsabhängige Massenübergangsbedingung zwischen feuchter Oberfläche und definierter Umgebungsatmosphäre.
- Die simultane Rückwirkung der Feuchteverteilung auf die Wärmeleitung und -speicherung im Betoninneren.

Der eigentliche Berechnungsprozeß beruht auf der numerischen Lösung eines Systems von zwei nicht-linearen, gekoppelten partiellen Differentialgleichungen, die aus Energie- und Massenbilanzen am Volumenelement resultieren. Die Koppelung beider gleichzeitig gültigen Beziehungen für den Wärme- und Feuchtetransport erfolgt über temperatur- und konzentrationsabhängige thermische und hygrische Materialeigenschaften.

### Praktische Anwendung

Für eine 2,4 m dicke Platte aus Normalbeton mit Kiessandzuschlägen (Rohdichte: 2200 kg/m<sup>3</sup>) führt eine unter praktischen Bedingungen durchgeführte Berechnung des Temperatur- und Feuchtefeldes zu überraschenden Ergebnissen. Bild 1 zeigt die für verschiedene Zeitpunkte des Reaktorbetriebes ermittelten Temperaturverteilungen. Man erkennt, daß sich etwa ab 28 Tagen ein annähernd lineares Temperaturgefälle einstellt, das sich im Verlaufe von 3 Jahren nur mehr wenig ändert. Nach 7 Tagen hingegen ist noch ein stark gekrümmter (instationärer!) Temperaturverlauf vorhanden. Trotz höherer „Fortpflanzungs-

geschwindigkeit“ der Wärme bleibt das Temperaturfeld infolge Feuchteeffekte solange instationär, bis das thermisch beeinflusste Feuchtfeld einen Beharrungszustand erreicht. Die errechnete Kurve stimmt relativ gut mit den Meßwerten überein.

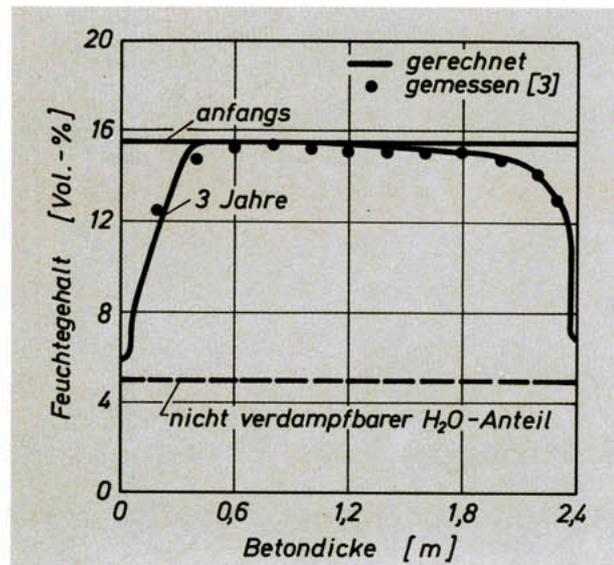


**Bild 1**  
Temperaturverteilungen über den Betonquerschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten

**Ausgangstemperatur**  
20 °C (konstant über den ganzen Querschnitt)  
**Meßwerte:** nach [2]

Bild 2 zeigt die Verteilung des Feuchtegehalts, wie sie sich nach einem Zeitraum von 3 Jahren unter den gegebenen praktischen Bedingungen im Spannbetonbehälter einstellt. Die Austrocknung der dem Reaktorkern zugekehrten Innenzone des Betons (linker Diagrammteil) ist nicht auf eine Feuchteabgabe zur Innenseite hin zurückzuführen; diese Oberfläche ist voraussetzungsgemäß ja feuchtedicht. Der dort erfolgte Feuchteabtransport ist vielmehr durch Temperatureffekte bedingt, die beim gekoppelten Wärme- und Feuchte-transport auch gegen das bestehende Konzentrationsgefälle wirksam werden. In den nahe der Außenoberfläche gelegenen Betonzonen treten gleichsinnige Temperatur- und Feuchtegradienten auf. Im Inneren des dickwandigen Betonkörpers sind – selbst nach 3 Jahren – praktisch keine Feuchteveränderungen gegenüber dem Ausgangszustand zu erkennen. Wie ein Vergleich mit den eingezeichneten Meßpunkten verdeutlicht, besteht zwischen den er-

rechneten und gemessenen Werten eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Das entwickelte Berechnungsverfahren kann deshalb bei den zugrundegelegten Bedingungen als zuverlässig und für die Praxis einsatzfähig angesehen werden.



**Bild 2**  
Instationäre Feuchteverteilungen über den Betonquerschnitt. Der nicht transportable H<sub>2</sub>O-Anteil (chemisch gebunden) ist aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Meßergebnissen additiv überlagert worden. Der Feuchtegehalt in den unmittelbaren Randzonen konnte bei [3] aus methodischen Gründen nicht gemessen werden; deshalb sind in den Randzonen keine Meßpunkte mehr eingetragen.

**Anfangsbedingungen (vor Aufnahme des Reaktorbetriebes)**  
Temperatur: 20 °C (konstant über den Betonquerschnitt)  
Feuchte: 15,5 Vol.-% (konstant über den Betonquerschnitt)

**Randbedingungen im Betrieb**  
**Reaktor-Innenseite:** Oberflächentemperatur 80 °C  
Feuchtedichter Abschluss  
**Außenseite der Betonplatte:** Umgebungstemperatur: 20 °C  
Umgebungsfeuchte: 45 % r. F.  
Stoffübergangskoeffizient: 28 m/h  
Wärmeübergangskoeffizient: 8 W/m<sup>2</sup>K

**Literatur**  
[1] Argyris, J. H., Warnke, E. P. und Willam, K. J.: Zur Berechnung von Temperatur- und Feuchtfeldern mit finiten Elementen. Schriftenreihe des DAfStb, Berichterstattung über die SBB-Tagung in Berlin am 13./14. Oktober 1975. Vortragsband Nr. 4. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin.  
[2] Hundt, J.: Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles. Schriftenreihe des DAfStb, Heft 256, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin (1975).  
[3] Hundt, J., Kantelberg, H. und Schimmelwitz, P.: Zur Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton. Bericht der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin (1976).

Die Untersuchungen wurden mit Unterstützung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton und des Bundesforschungsministeriums durchgeführt.



Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung des Instituts für Bauphysik

INSTITUT FÜR BAUPHYSIK DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT  
7 STUTTGART 70 DEGERLOCH, Königstraße 74, Tel. (07 11) 76 50 08/09  
Außenstelle: 815 HOLZKIRCHEN (OBB.), Postfach 1180, Tel. (080 24) 572