

# Relative Luftfeuchtemessung zur Erfassung der Wassersättigung von Beton

Eine Möglichkeit der Erfassung des Wassersättigungsgrads von Beton stellt die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit eines mit dem Beton im Gleichgewicht stehenden Hohlraums dar. Die indirekte Natur dieser Methode erfordert die Kenntnis der thermodynamischen Zusammenhänge, um brauchbare Informationen zur Wassersättigung zu erhalten. Die Berechnung der Wassersättigung erfordert sowohl die Erfassung der Luftfeuchtigkeit als auch der Temperatur. In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse dieser Methode dargestellt. Interessant war die Beobachtung, dass die Wassersättigung von beschichteten Bauteilen konstant blieb, obwohl sich die gemessene Luftfeuchtigkeit im Hohlraum mit den täglichen und saisonalen Temperaturschwankungen änderte.

## 1 Einleitung

Der Wassersättigungsgrad von Beton spielt eine wichtige Rolle bei verschiedenen chemischen und physikalischen Schädigungen von Betonbauteilen. Zum Beispiel ist die Betonschädigung durch Alkali-Aggregat-Reaktion oder durch Frost/Tauwechsel wesentlich vom Wassersättigungsgrad abhängig. Hinsichtlich der Korrosion der Bewehrung sind sowohl die Karbonatisierungsgeschwindigkeit als auch die Chlorideindringung stark mit dem Wassersättigungsgrad verknüpft. Auch der elektrolytische Widerstand des Betons ist wesentlich vom Wassersättigungsgrad abhängig, wie auch die Verfügbarkeit des für den Korrosionsvorgang nötigen Sauerstoffs [1 bis 3].

Zur Erfassung des Wassersättigungsgrads existiert eine Anzahl von technischen Möglichkeiten, wie z. B. zerstörende Probenahme, Messung des elektrolytischen Widerstands, Messung von dielektrischen Eigenschaften oder thermischen Eigenschaften, Infrarot-Absorption, Neutronenstreuung oder kernmagnetische Resonanzspektroskopie. Eine häufig eingesetzte und relativ einfache Technik stellt die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit eines mit dem Beton im Gleichgewicht stehenden Hohlraums dar. Dabei wird der Messfühler in ein Bohrloch eingeführt und oberflächlich das Bohrloch gegen die äußere Atmosphäre abgedichtet. Jedoch erfordert die Berechnung des Wassersättigungsgrads die Kenntnis der Thermodynamik von porösen Systemen. Kapillareffekte spielen eine große Rolle.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurde die Adsorptionsisotherme im Labor bestimmt, die restlichen Messdaten stammen allesamt aus Feldinstallationen.

## Relative humidity measurements for assessing moisture conditions in concrete structures

One way of detecting the water saturation degree of concrete represents the measurement of the relative humidity in a cavity in concrete which is in equilibrium with moisture content in concrete. The indirect nature of this method requires knowledge of the thermodynamic relationships in order to obtain useful information on water saturation. Calculating the water saturation degree of concrete requires both detection of the humidity and the temperature. In the present study, the results of this method are presented. It was interesting to observe that the saturation degree of coated concrete structures remained constant, even though the measured humidity in the cavity changed with the daily and seasonal temperature fluctuations.

## 2 Zweck der Untersuchung

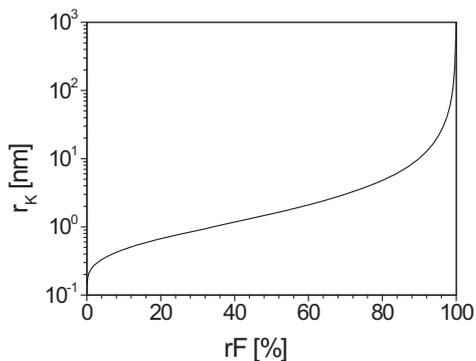
Der elektrolytische Widerstand des Betons, der die Korrosionsrate wesentlich beeinflusst, ist abhängig von der Betonporosität, dem Wassersättigungsgrad und der Ionenkonzentration des Porenelektrolyten. Der Grad der Wassersättigung als ein Einflussparameter soll in dieser Arbeit getrennt untersucht werden.

Zweck der Untersuchungen war es, aus den Ergebnissen der Messung von relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur in einem Hohlraum im Beton den tatsächlichen Wassersättigungsgrad des Betons zu berechnen. Diese Berechnungen erfolgten auf Basis der Thermodynamik. Ziel der Untersuchungen war es, die Temperatureffekte der Messtechnik zu eliminieren und dadurch die klare Erfassung anderer äußerer Einflüsse (als der Temperatur) auf den Sättigungsgrad des Betons zu ermöglichen.

## 3 Theoretischer Hintergrund

Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Wassersättigungsgrad von Beton und der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht linear, da das Porenwasser in engen Poren fester gebunden ist als in weiten Poren. Grundsätzlich kann man jedoch die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung heranziehen, um den Wassersättigungsgrad von Beton, der mit der Umgebung im Gleichgewicht steht, zu berechnen.

$$rF [\%] = \frac{\text{Partialdruck von H}_2\text{O}}{\text{Sättigungsdampfdruck von H}_2\text{O}} \cdot 100 \quad (1)$$



**Bild 1** Kelvinradius als Funktion der relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit bei T = 298 K  
 Kelvin radii  $r_K$  as a function of relative humidity in concrete at T = 298 K

Wird Beton der Umgebungsluft ausgesetzt, füllen sich die Betonporen so lange mit Wasser, bis Gleichgewicht mit dem Wasserdampf in der Umgebungsluft herrscht. Die Wasserkondensation und -desorption basiert auf der Kelvin-Gleichung:

$$\ln \frac{p_{H_2O}}{p_{s,H_2O}} = - \frac{2 \cdot M_{H_2O} \cdot \sigma_{H_2O}}{\rho_{H_2O} \cdot R \cdot T \cdot r_K} \quad (2)$$

mit:

- $p_{H_2O}$  H<sub>2</sub>O-Dampfdruck [Pa]
- $p_{s,H_2O}$  H<sub>2</sub>O-Dampfdruck bei Sättigung [Pa]
- $M_{H_2O}$  Molare Masse von H<sub>2</sub>O [kg/mol]
- $\sigma_{H_2O}$  Oberflächenspannung von H<sub>2</sub>O [N/m]
- $\rho_{H_2O}$  Dichte von H<sub>2</sub>O [kg/m<sup>3</sup>]
- R Universale Gaskonstante [J/Kmol]
- T Temperatur [K]
- $r_K$  Kelvinradius [m]

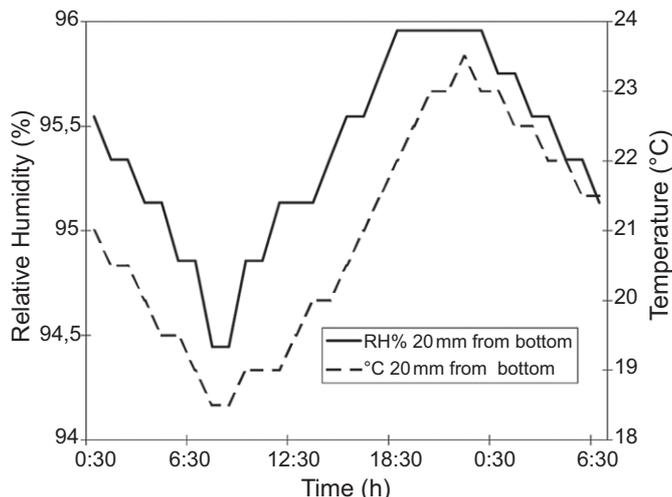
und mit  $p_{H_2O}/p_{s,H_2O} \times 100\%$  als der bekannten relativen Luftfeuchtigkeit rF.

Gemäß Gl. (2) steigt der Radius der Poren, die mit Wasser gefüllt sind, mit steigender Umgebungsluftfeuchtigkeit und umgekehrt. Bei geringer Umgebungsluftfeuchtigkeit sind nur die engen Poren mit Wasser gefüllt, während bei steigender rF Poren mit größerem Radius ebenfalls wassergefüllt sind, wie Bild 1 zeigt.

In der Literatur wird über die Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit eines Betonhohlraums im Gleichgewicht mit einem porösen System konstanten Sättigungsgrads von der Temperatur berichtet [4 bis 7]. Messungen von PAROLL und NYKÄNEN [8] zeigen, dass die in Betonhohlräumen gemessene relative Luftfeuchtigkeit der Temperatur bei Tag/Nacht-Zyklen folgt (Bild 2).

Erklären lässt sich die Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte in einem Betonbohrloch mit der T-Abhängigkeit der Oberflächenspannung von Wasser. Diese sinkt linear mit T nach:

$$\sigma_{H_2O}(T) = A - BT \quad (3)$$



**Bild 2** Änderung der relativen Feuchte im Betonbohrloch mit der Temperatur (aus [8])  
 Variation of relative humidity in concrete versus temperature [8]

mit:

- A = 0,11784 Nm<sup>-1</sup>
- B = 1,5411 · 10<sup>-4</sup> Nm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> zwischen 0 und 50 °C [9].

Kombiniert man nun Gl. (2) mit Gl. (3), so erhält man folgenden Ausdruck:

$$\ln \left( \frac{rF(T)}{100} \right) = - \frac{2 \cdot M_{H_2O}}{\rho_{H_2O} \cdot R \cdot T \cdot r_K} \cdot (A - B \cdot T) \quad (4)$$

was gleichbedeutend ist mit:

$$rF(T) = 100 \cdot \exp \left( \frac{2 \cdot M_{H_2O} \cdot B}{\rho_{H_2O} \cdot R \cdot r_K} \right) \cdot \exp \left( - \frac{2 \cdot M_{H_2O} \cdot A}{\rho_{H_2O} \cdot R \cdot r_K \cdot T} \right) \quad (5)$$

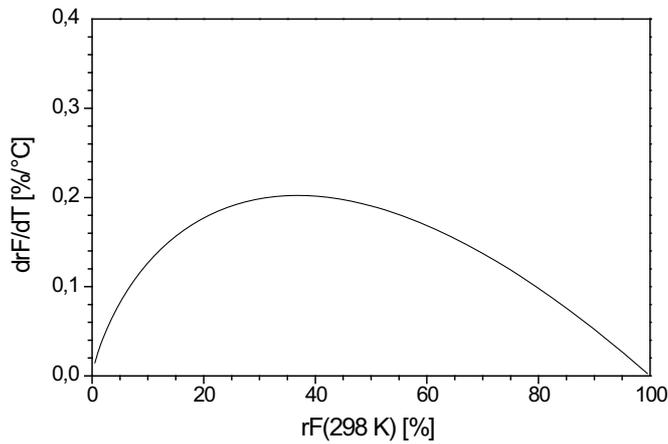
Die Gl. (5) zeigt, dass rF exponentiell mit (-1/T) steigt. Tatsächlich berichtet die Literatur über einen Gradienten d(RH)/dT von 0,2–0,3 % RH/°C [10]. Theoretisch lässt sich der Gradient durch folgende Gleichung wiedergeben:

$$\frac{d}{dT} rF(T) = 100 \cdot \exp \left( \frac{2 \cdot M_{H_2O} \cdot B}{\rho_{H_2O} \cdot R \cdot r_K} \right) \cdot \frac{2 \cdot M_{H_2O} \cdot A}{\rho_{H_2O} \cdot R \cdot r_K \cdot T^2} \cdot \exp \left( - \frac{2 \cdot M_{H_2O} \cdot A}{\rho_{H_2O} \cdot R \cdot r_K \cdot T} \right) \quad (6)$$

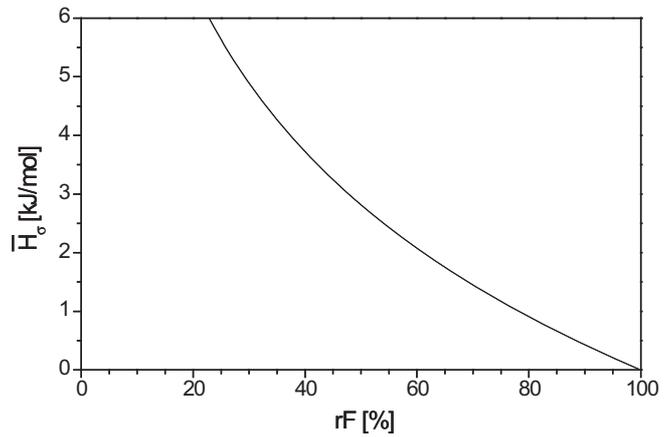
Der Verlauf des theoretischen Gradienten ist in Bild 3 dargestellt, der in guter Übereinstimmung mit dem tatsächlich gemessenen steht (Bild 4).

Die Einheit des Ausdrucks  $\frac{2 \cdot M_{H_2O} \cdot A}{\rho_{H_2O} \cdot r_K}$  ist [J/mol] und

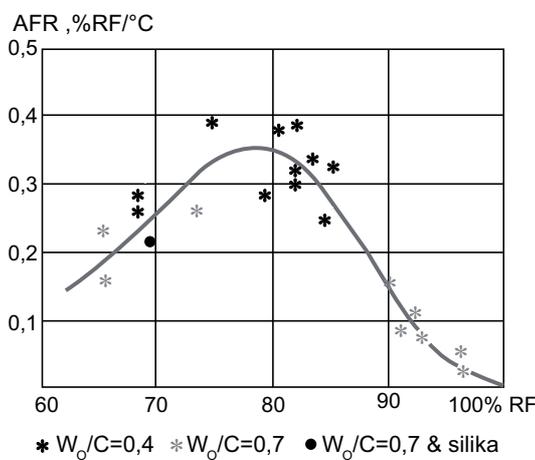
kann daher als Energie behandelt werden. Aus thermodynamischen Überlegungen kann der Ausdruck als molare Oberflächenenthalpie  $\bar{H}_\sigma$  für eine gekrümmte Oberfläche des Radius  $r_K$  bezeichnet werden [11].



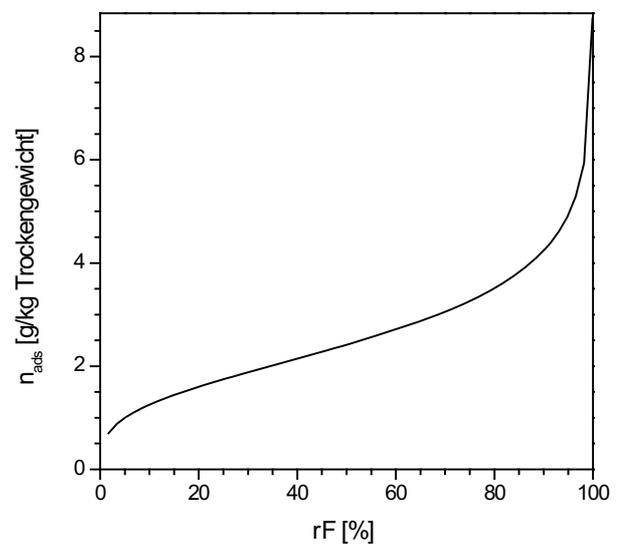
**Bild 3** Verlauf des theoretischen Gradienten von rF als Funktion von rF(298 K)  
Calculated temperature gradient of RH at 298 K as a function of RH



**Bild 5** Theoretische Oberflächenenthalpie für Wasser in den Betonporen  
Theoretical molar surface enthalpy for a curved surface of radius  $r_K$  as a function of RH in the pore system



**Bild 4** Gemessene Werte für den Gradienten von rF für verschiedene Werte von rF (aus [6])  
Measured temperature gradient of RH for different values of RH [6]



**Bild 6** Idealierte Adsorptionsisotherme für Beton  
Idealized adsorption isotherm for concrete expressed as saturation by weight of dry sample

Aufgrund der Beziehung zwischen  $r_K$  und rF ist die Oberflächenenthalpie ebenfalls von der relativen Umgebungfeuchte abhängig. Sie sinkt mit steigender Luftfeuchtigkeit (Bild 5). Die Oberflächenenthalpie ist hoch für kleine Poren und klein für große Poren. Bei 100 % rF macht es keinen Unterschied, ob Wasserdampf auf einer planaren oder gekrümmten Oberfläche kondensiert. Die Oberflächenenthalpie nähert sich Null.

Theoretisch ist es möglich, aus rF- und T-Messungen den Sättigungsgrad von Beton zu bestimmen. Dafür benötigt man noch eine Adsorptionsisotherme (wie in Bild 6 gezeigt), die den Zusammenhang zwischen rF und dem Sättigungsgrad beschreibt. Aus der Adsorptionsisotherme ließe sich auch die Porenverteilung bestimmen. Die Menge adsorbierten Wassers  $n_{ads}$  entspräche dem Volumen der gesättigten Betonporen  $V_{ads}$ . Des Weiteren kann die relative Feuchte nach Gl. (2) durch den Kelvinradius ausgedrückt werden. Die Porenradiusverteilung wäre demnach durch die Ableitung  $dV_{ads}/dr_K$  oder  $dV_{ads}/d(\log r_K)$  erhältlich.

Eine experimentell erhaltene Adsorptionsisotherme kann nun mit dem theoretischen Modell, welches von

ADOLPHS und SETZER [12 bis 14] aufgestellt wurde, durch folgenden Ausdruck beschrieben werden:

$$n_{ads} = n_{mono} \cdot \left( 1 - \ln \left| \frac{\Delta\mu}{\Delta\mu_{mono}} \right| \right) \quad (7)$$

mit:

- $n_{ads}$  Menge adsorbierten Wassers
- $n_{mono}$  Menge adsorbierten Wassers für eine Monoschicht
- $\Delta\mu$  Änderung des chemischen Potentials während der isothermen Adsorption ( $\Delta\mu = RT \ln \left( \frac{p}{p_s} \right)$ )
- $\Delta\mu_{mono}$  Änderung des chemischen Potentials bei Monoschichtbelegung

Unter der Annahme einer vollständigen Adsorption bei  $rF = 99,9\%$  kann Gl. (7) folgendermaßen umgeformt werden:

$$n_{ads, RH=99,9\%} = n_{mono} \cdot \left( 1 - \ln \left| \frac{RT \ln(0,999)}{\Delta\mu_{mono}} \right| \right) \quad (8)$$

Nachdem der Sättigungsgrad definiert ist als:

$$SD = \frac{n_{ads}}{n_{ads, RH=99,9\%}} \quad (9)$$

gilt:

$$SD = \frac{1 - \ln \left| \frac{RT \ln \left( \frac{p}{p_s} \right)}{\Delta\mu_{mono}} \right|}{1 - \ln \left| \frac{RT \ln(0,999)}{\Delta\mu_{mono}} \right|} \quad (10)$$

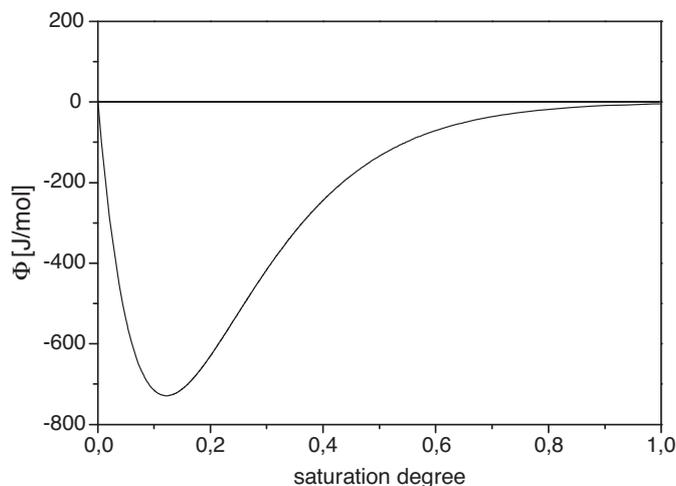
Zur Berechnung des Sättigungsgrads ist nun noch die Kenntnis von  $\Delta\mu_{mono}$  nötig. Die erhält man durch eine Kurvenanpassung von experimentellen Messwerten mit Gl. (10).

ADOLPHS und SETZER führten auch den Begriff „excess surface work“ ein. Mit diesem Parameter lässt sich die Belegung der Porenoberfläche durch eine Monoschicht einfach erhalten. Davon ableitbar ist auch die innere Porenoberfläche eines porösen Baustoffs, wie später gezeigt.

Die „excess surface work“ ist definiert als:

$$\Phi = n_{ads} \cdot RT \ln \left( \frac{p}{p_s} \right) \quad (11)$$

Wenn man nun wie in Bild 7  $\Phi$  gegen den Sättigungsgrad aufträgt, erhält man ein Minimum bei der Wassermenge, die nötig ist, um die Poren mit einer Monoschicht zu belegen. Mithilfe dieser Menge lässt sich die innere Ober-



**Bild 7** Schematische Darstellung der „excess surface work“  $\Phi$  gegen den Sättigungsgrad  
Schematic plot of the “excess surface work”  $\Phi$  against saturation degree

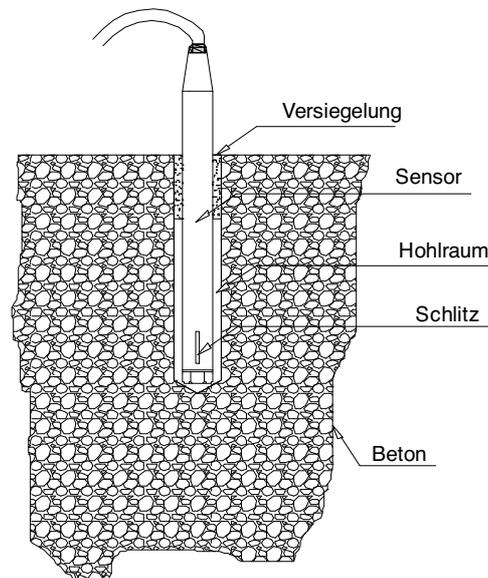
fläche berechnen. Mit diesem theoretischen Hintergrund wurden die praktisch erhaltenen Daten ausgewertet.

#### 4 Experimentelle Durchführung

Zur Bestimmung des chemischen Potentials für die Monoschichtadsorption wurden vier Betonproben einer Parkhausdecke vollständig wassergesättigt und kontrolliert getrocknet. Die Dichte (bestimmt nach dem archimedischen Prinzip) betrug  $2264 \pm 21 \text{ kg/m}^3$  für den vollständig getrockneten Beton und  $2400 \pm 15 \text{ kg/m}^3$  für den vollständig wassergesättigten Beton. Das gesamte Porenvolumen betrug  $11,6 \pm 2,1 \%$  [15]. Feldmessungen wurden in Betondecken von zwei Parkhäusern (eine Messstelle in Parkhaus A und drei Messstellen in Parkhaus B) durchgeführt. Zusätzlich befand sich eine Messstelle an einer Betonwand eines Düngemittelverteilterturms in einer Düngemittelfabrik. Alle Bauwerke befanden sich in der Nähe von Oslo, Norwegen.

Die Betondecken der Parkhäuser waren beidseitig beschichtet, an der Oberseite mit einer ca. 5 mm dicken Polyurethanschicht und an der Unterseite mit einer ca. 700  $\mu\text{m}$  dicken sogenannten „CO<sub>2</sub>-Bremsen“ auf Acrylatbasis. Das Betonmauerwerk der Düngemittelfabrik war unbeschichtet. Die Messungen wurden über einen Zeitraum von ca. vier Jahren durchgeführt.

50 mm tiefe Löcher mit einem Durchmesser von 9 mm wurden in den Beton gebohrt. Das Hohlraumvolumen betrug somit ca. 3 cm<sup>3</sup>. In den Hohlraum wurde jeweils ein hygrometrischer Sensor eingeführt, mit dem kontinuierlich die beiden Variablen rF (relative Feuchte) und T (Temperatur) im Intervall von einer Stunde erfasst wurden. Der Sensorkopf besteht aus einem hygroskopischen Material, dessen dielektrische Eigenschaften sich mit der Luftfeuchtigkeit der Umgebung ändern. Die Temperaturmessung erfolgte mit einem PT100-Sensor (Bild 8).

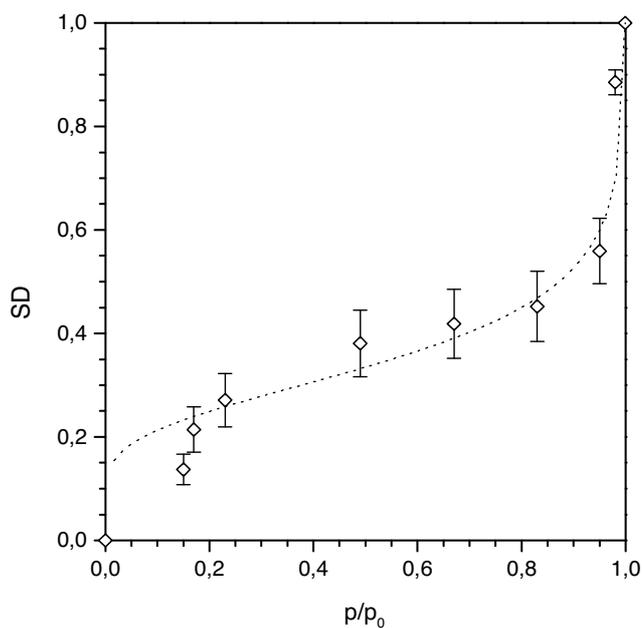


**Bild 8** Hygrometrischer Sensor im Hohlraum (Bohrloch)  
Hygrometric sensor in a cavity (drill-hole)

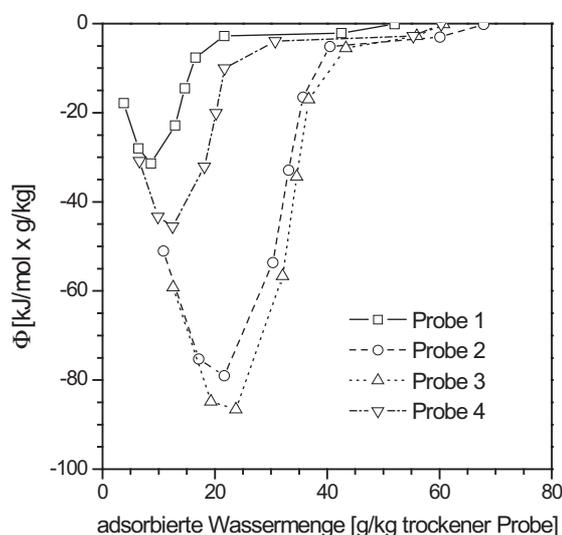
## 5 Diskussion der Ergebnisse

### 5.1 Absorptionseigenschaften

Der Zusammenhang zwischen Wassersättigungsgrad und Umgebungsluftfeuchtigkeit bei Raumtemperatur ist für die untersuchten Betonproben in Bild 9 gezeigt. Eine Kurvenanpassung von Gl. (10) ergab einen Wert für  $\Delta\mu_{\text{mono}} = -17,0 \pm 7,6$  kJ/mol. Dabei wurde die Monoschichtbelegung nach Bild 11 ermittelt. Die Literatur berichtet von Werten zwischen 30,7 und 42,4 kJ/mol für hydratisierte Zementpaste [13]. Wegen des einfachen Messaufbaus mit den zu erwartenden ungenauen Messergebnissen ist zumindest die qualitative Übereinstimmung mit der Literatur zufriedenstellend.



**Bild 9** Zusammenhang zwischen Umgebungsluftfeuchtigkeit und Wassersättigungsgrad mit Kurvenanpassung  
Curve fit for the saturation degree in equilibrium with the ambient relative humidity



**Bild 10** „Excess surface work“  $\Phi$  gegen adsorbierte Wassermenge  
“Excess surface work“  $\Phi$  versus amount water adsorbed

Von größerer praktischer Relevanz sind die Resultate aus der Auswertung des Plots der „excess surface work“ gegen die Wassersättigung. Die Wassermenge für die Monoschichtadsorption ergab einen Wert von etwa 10–20 g/kg Probe.

Die innere Oberfläche lässt sich dann berechnen nach:

$$A = \frac{n_{\text{mono}} \cdot a \cdot N_A}{M_r} \quad (12)$$

mit:

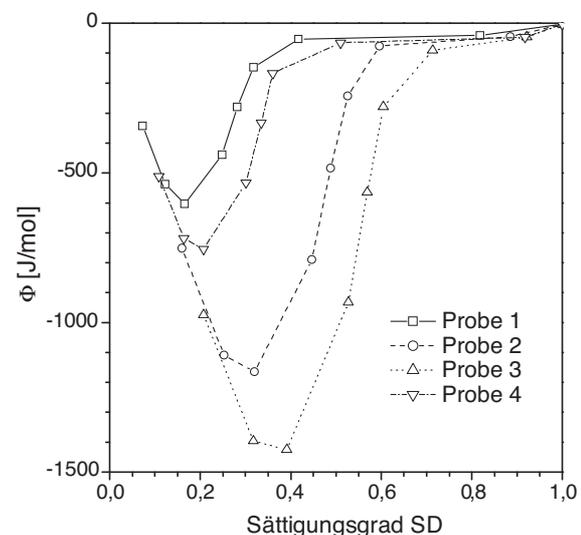
- A innere Oberfläche [m<sup>2</sup>/g]
- $n_{\text{mono}}$  Monoschichtadsorption [g/g]
- a Belegungsfläche eines einzigen Moleküls [m<sup>2</sup>]
- $N_A$  Avogadrokonstante
- $M_r$  Molekulare Masse des Adsorbates [g/mol]

Verwendet man die Belegungsfläche von 11,4 Å<sup>2</sup> für ein Wassermolekül [16], so reduziert sich diese Formel zu:

$$A = 3812 \cdot n_{\text{mono}} \text{ [m}^2\text{/g]} \quad (13)$$

Wird die Dichte von Wasser mit 1 kg/l festgelegt, so erhält man für die innere Oberfläche der Betonproben 38 bis 76 m<sup>2</sup>/g. Die Literatur gibt einen Wert von 200 m<sup>2</sup>/g an [17]. Wiederum sei wegen des einfachen Versuchsaufbaus und der einfachen Durchführung zumindest auf die qualitative Übereinstimmung hingewiesen.

Das Minimum in Bild 11 tritt bei einem Sättigungsgrad zwischen 10 und 40% auf. Bei dieser relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit ist die innere Porenoberfläche mit einer Monoschicht von Wassermolekülen belegt. Bei niedrigeren Sättigungsgraden würde dieser Film abreißen. Dieser Befund deckt sich mit der Beobachtung von GONZÁLEZ et al., die einen kritischen Wert für die Porensättigung von SD = 30% definierten. Bei diesem kritischen Wert hört Korrosion infolge eines elektrolytischen



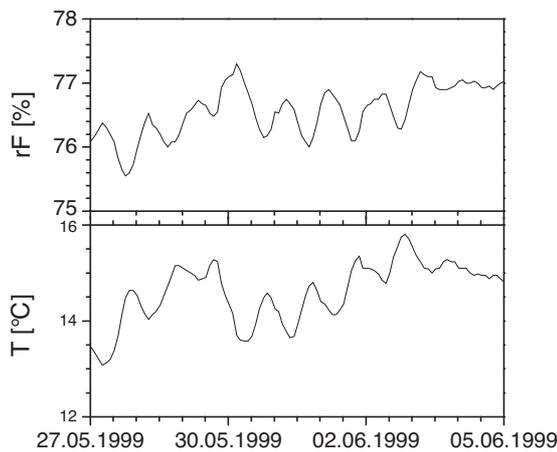
**Bild 11** „Excess surface work“  $\Phi$  gegen Sättigungsgrad  
“Excess surface work“  $\Phi$  versus saturation degree

Betonwiderstands von  $\rho_{\text{Beton}} > 1\,000\text{ k}\Omega\text{cm}$  praktisch auf [18].

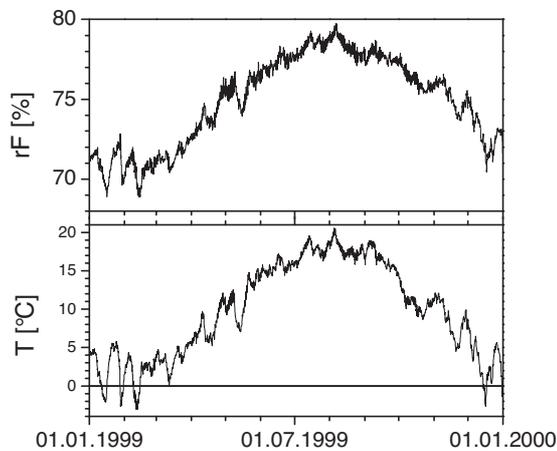
### 5.2 Standardisierung der Feuchtemessungen

Im Laufe der Erfassung der Messwerte von den Sensoren in den unterschiedlichen Betonbauteilen wurde bald klar, dass nicht nur die Änderung der atmosphärischen Luftfeuchtigkeit die Messwerte beeinflusst, sondern vor allem auch die Temperatur. In den Messwerten für die relative Luftfeuchtigkeit spiegeln sich sowohl Tag/Nachtzyklen als auch jahreszeitliche Schwankungen wider, wie leicht in den Bildern 12 und 13 erkennbar ist.

Die beobachteten Kurz- und Langzeitvariationen der relativen Luftfeuchtigkeit in der Betondecke des Parkhauses A zeigen augenscheinlich, dass die Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit temperaturabhängig sein muss, da für die beidseitig beschichteten Betonelemente eine Änderung des Wassersättigungsgrads als eher unwahrscheinlich angesehen wird, wenn nur die Temperatur sich ändert.



**Bild 12** Tag/Nacht-Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Bohrloch (Parkhaus A)  
Diurnal variation of RH in a cavity of Park Deck A versus temperature



**Bild 13** Jahreszeitliche Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Bohrloch  
Seasonal variation of RH in a cavity of Park Deck A versus temperature

### 5.3 Anwendung der Standardisierung

Unter der Annahme, dass sich der Wassersättigungsgrad im Betonbauteil nicht ändert (das Bauteil ist beidseitig wasserdicht beschichtet), bleibt nur die temperaturabhängige Oberflächenspannung, die für die Änderung der Messwerte für  $rF$  verantwortlich ist. Es wurden daher sämtliche  $rF$ -Werte in  $rF$ -Werte bei Standardtemperatur ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) umgerechnet. Bei konstantem Sättigungsgrad bleibt naturgemäß der Kelvinradius auch konstant. Es ergibt sich daher aus Gl. (2) und  $r_K = \text{const.}$  folgender Zusammenhang:

$$\frac{\ln\left(\frac{\text{RH}(298\text{ K})}{100}\right)}{\ln\left(\frac{\text{RH}(T)}{100}\right)} = \frac{T}{298\text{ K}} \cdot \frac{\frac{A}{298\text{ K}} - B}{\frac{A}{T} - B} \quad (14)$$

oder:

$$\text{RH}(298\text{ K}) = 100 \cdot \exp\left[ \ln\left(\frac{\text{RH}(T)}{100}\right) \cdot \frac{T}{298\text{ K}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{298\text{ K}} - \frac{B}{A}\right)}{\left(\frac{1}{T} - \frac{B}{A}\right)} \right] \quad (15)$$

Der Ausdruck  $\frac{B}{A}$  in Gl. (15) entspricht im Idealfall der reziproken kritischen Temperatur von Wasser  $T_K$ , da Gl. (3) in die bekannte Eotvos-Gleichung umgeformt werden kann:

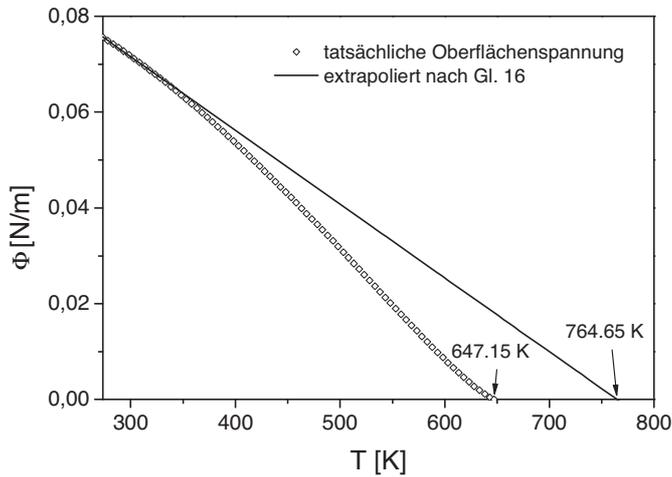
$$\sigma(T) = a \left(1 - \frac{T}{T_K}\right) \quad (16)$$

Dadurch ergibt sich für Gl. (15) folgender Ausdruck:

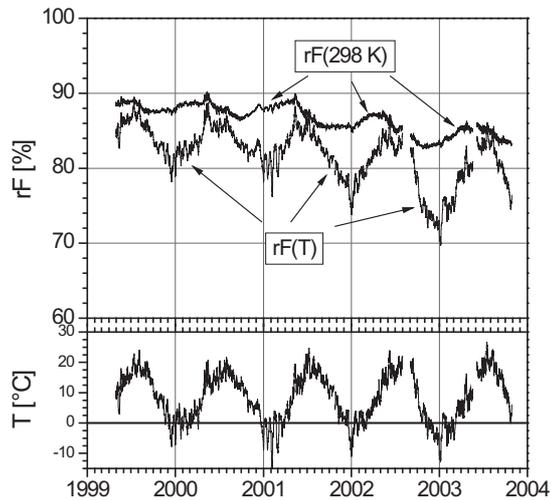
$$\text{RH}(298\text{ K}) = 100 \cdot \exp\left[ \ln\left(\frac{\text{RH}(T)}{100}\right) \cdot \frac{T}{298\text{ K}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{298\text{ K}} - \frac{1}{T_K}\right)}{\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_K}\right)} \right] \quad (17)$$

Die Gl. (16) gilt streng genommen für nicht assoziierte Flüssigkeiten, daher weicht auch die Oberflächenspannung als Funktion der Temperatur im Realfall von der Linearität ab (Bild 14). Der extrapolierte Wert für  $T_K$  unterscheidet sich von der tatsächlichen kritischen Temperatur um mehr als 100 K.

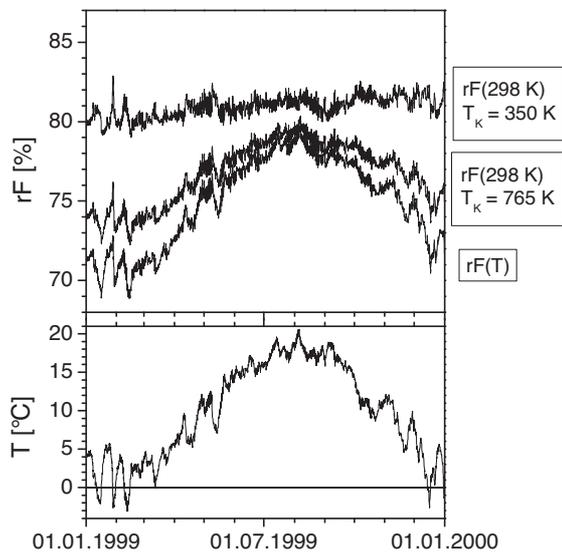
Jedoch weder ein Wert von 647 K noch der Wert von 765 K lieferten zufriedenstellende Ergebnisse für die Standardisierung von  $rF$ . Die besten Werte zur Umrechnung in die Luftfeuchtigkeit bei Standardbedingungen lieferte ein Wert von 350 K, wie in Bild 15 gezeigt. Diese Temperatur wird fortan als charakteristische Temperatur  $T_\chi$  bezeichnet. Die Standardisierung der relativen Feuchte erfolgt also nach:



**Bild 14** Oberflächenspannung von Wasser über den gesamten Bereich bis TK sowie die nach Gl. (3) extrapolierten Werte  
Dependence of the surface tension of water on temperature compared to values extrapolated by Gl. (3)



**Bild 16** rF(T) und rF(298 K) für Messstelle 1 in der Betondecke von Parkhaus B  
RH(T) and RH(298 K) with time for Location 1 (Park Deck B)



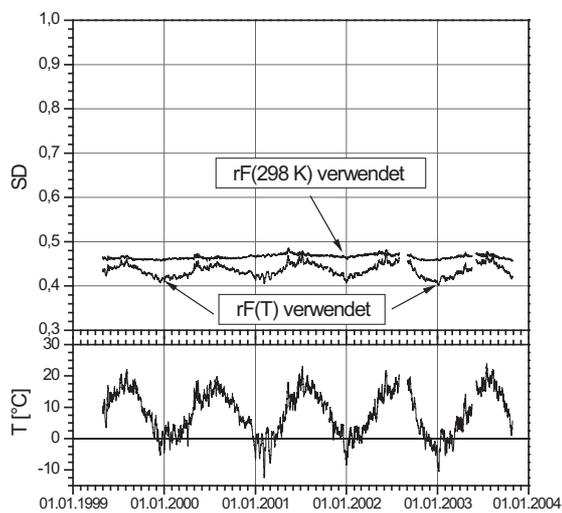
**Bild 15** Standardisierung von rF auf 25 °C unter Verwendung von  $T_k = 765$  K und 350 K  
Standardization of the measured relative humidity RH(T) in Concrete Deck A with  $T_k = 765$  K and 350 K, respectively

$$RH(298\text{ K}) = 100 \cdot \exp \left[ \ln \left( \frac{RH(T)}{100} \right) \cdot \frac{\left( \frac{1}{298\text{ K}} - \frac{1}{T_x} \right)}{\left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_x} \right)} \right] \quad (18)$$

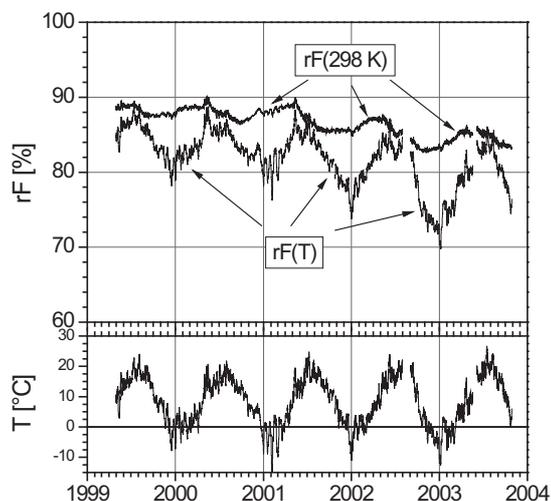
Verwendet man Gl. (18) für die Standardisierung der relativen Feuchte im Hohlraum, so wird erwartet, dass die Temperatureffekte eliminiert sind (Bild 15).

In den Bildern 16 bis 25 werden einige typische Änderungen für die standardisierte Feuchte rF(298 K) an den genannten Betonbauwerken gezeigt. Gleichzeitig werden die nicht standardisierten Messwerte dargestellt.

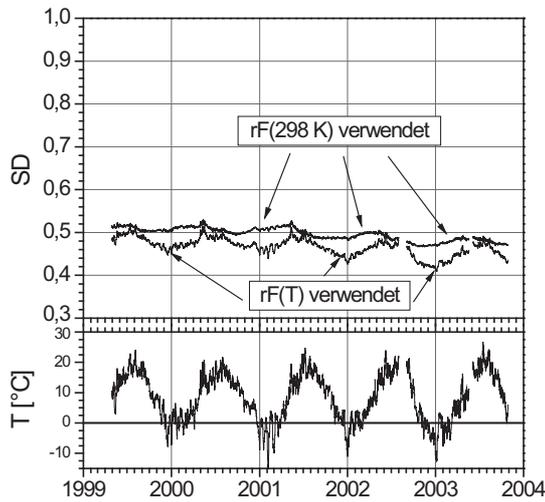
Die Betondecke von Parkhaus B mit der Messstelle 1 ist an der Oberseite mit einer luft- und wasserdichten



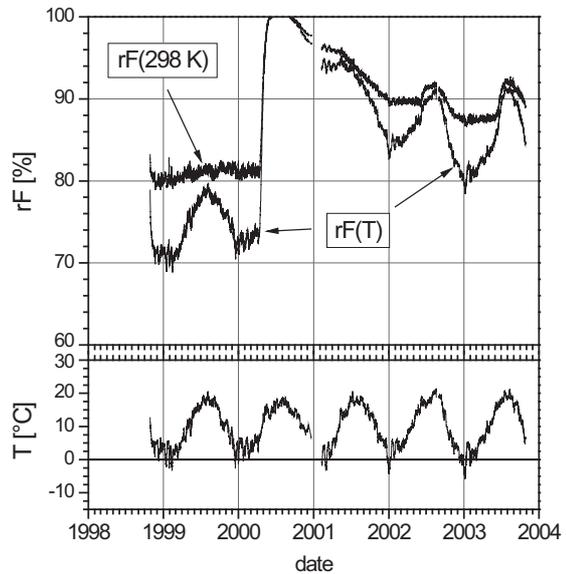
**Bild 17** Sättigungsgrad bei Messstelle 1 (Parkhaus B) unter Verwendung von rF(T) und rF(298 K)  
Saturation degree with time for Location 1 (Park Deck B) using both RH(T) and RH(298 K)



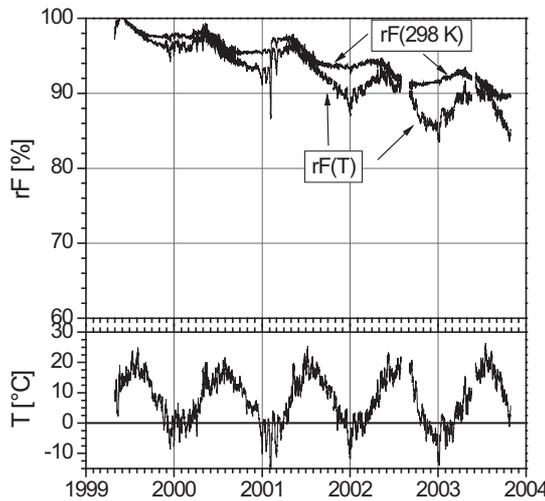
**Bild 18** rF(T) und rF(298 K) für Messstelle 2 in der Betondecke von Parkhaus B  
RH(T) and RH(298 K) with time for Location 2 (Park Deck B)



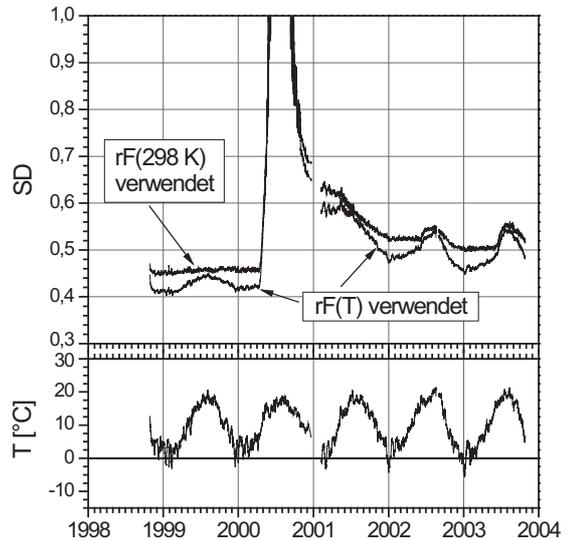
**Bild 19** Sättigungsgrad bei Messstelle 2 (Parkhaus B) unter Verwendung von rF(T) und rF(298 K)  
Saturation degree with time for Location 2 (Park Deck B) using both RH(T) and RH(298 K)



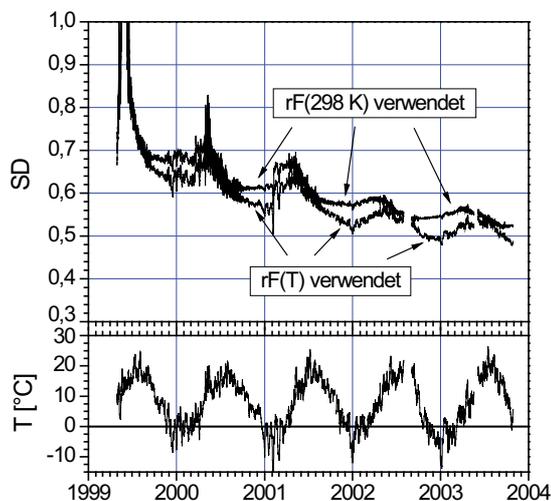
**Bild 22** rF(T) und rF(298 K) für die Messstelle in der Betondecke von Parkhaus A  
RH(T) and RH(298 K) with time for Park Deck A



**Bild 20** rF(T) und rF(298 K) für Messstelle 3 in der Betondecke von Parkhaus B  
RH(T) and RH(298 K) with time for Location 3 (Park Deck B)



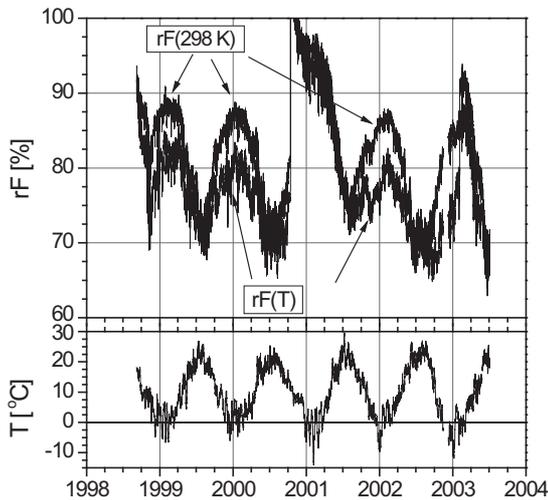
**Bild 23** Sättigungsgrad bei der Messstelle (Parkhaus A) unter Verwendung von rF(T) und rF(298 K)  
Saturation degree with time for Park Deck A using both RH(T) and RH(298 K)



**Bild 21** Sättigungsgrad bei Messstelle 3 (Parkhaus B) unter Verwendung von rF(T) und rF(298 K)  
Saturation degree with time for Location 3 (Park Deck B) using both RH(T) and RH(298 K)

Schicht aus PU belegt, an der Unterseite mit einer dicken Akrylatbeschichtung (CO<sub>2</sub>-Bremse). Es wird angenommen, dass die beobachteten Änderungen der relativen Feuchte im Bohrloch nur durch Temperaturvariationen zustande kamen. Die Messwerte rF(T) folgten über den Messzeitraum von 4,5 Jahren beinahe ausschließlich der Temperatur (Mittelwert: 76,3%  $\sigma = 3,0\%$ ). Die berechnete standardisierte relative Feuchte rF(298 K) erwies sich als äußerst konstant über den gleichen Zeitraum mit einem Mittelwert von 82,5% und einer Standardabweichung  $\sigma = 0,7\%$  (Bild 16).

Wendet man nun Gl. (10) zur Berechnung des Verlaufs des Sättigungsgrads für beide Wertekurven (rF(T) und rF(298 K) an, so zeigt sich, dass sich der Sättigungsgrad



**Bild 24**  $rF(T)$  und  $rF(298\text{ K})$  für die Messstelle im Düngemittelverteiltertum RH(T) and RH(298 K) with time for the concrete wall in the fertilizer distribution tower

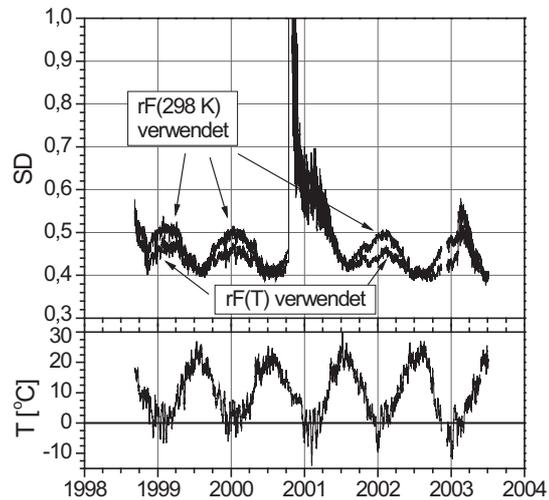
$SD(T)$  für die nicht standardisierte Feuchte zwischen den Werten 0,40 und 0,47 bewegt (Mittelwert 0,435,  $s = 0,014$ ), während  $SD(298\text{ K})$  basierend auf der standardisierten Feuchte  $rF(298\text{ K})$  nur zwischen 0,46 und 0,49 variiert (Mittelwert 0,466,  $\sigma = 0,005$ ).

An der Messstelle 2 des Parkhauses B ist die Situation ähnlich (Bilder 18 und 19). Jedoch ist hier eine leichte Austrocknung des Betons erkennbar. Die standardisierte relative Feuchte fällt von anfänglich 88 % auf 85 % entsprechend einer Abnahme des Sättigungsgrads von 0,51 auf 0,48. An dieser Messstelle ist die jahreszeitliche Schwankung in  $rF(298\text{ K})$  deutlicher ausgeprägt. Mitte Mai durchläuft  $rF(T)$  ein Maximum, danach nimmt  $rF(T)$  zu einem flachen Minimum von Oktober bis Januar ab. Danach steigt der Wert wieder.

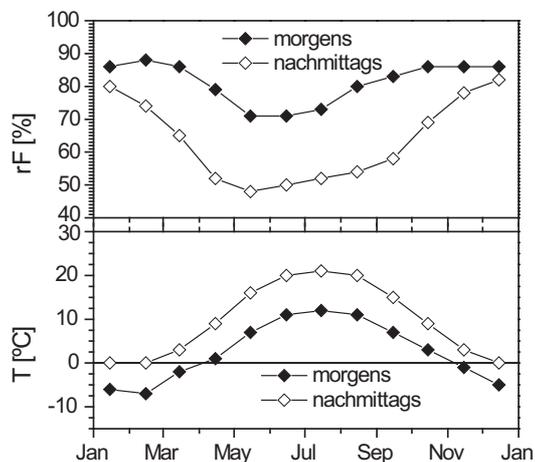
Bei der Messstelle 3 des Parkhauses B nahm die standardisierte relative Feuchte von anfangs ca. 100 % auf 90 % über den Messzeitraum von vier Jahren ab (Bilder 20 und 21). Die Messkurve ist hier ebenfalls mit einer saisonalen Schwankung überlagert – mit Maxima im Mai und flachen Minima von Oktober bis Januar. Hier zeigt sich eine deutliche Austrocknung durch die Abnahme des Sättigungsgrads des Betons von 1 auf ca. 0,53.

Interessant ist der Verlauf von  $rF(298\text{ K})$  respektive  $SD(298\text{ K})$  in der Messstelle des Parkhauses A (Bilder 22 und 23). Anfänglich ist der Verlauf der Kurven ähnlich, wie in den zuvor diskutierten Fällen, jedoch stieg  $rF(298\text{ K})$  am 14. April 2000 abrupt von 80 % auf 100 % an. Nach Rücksprache mit dem Parkhausbetreiber stellte sich heraus, dass das Parkhaus zu genau diesem Zeitpunkt gewaschen wurde. Weitere Reinigungen durch Waschen erfolgten wahrscheinlich am 9. Juni 2002 und am 9. Juni 2003.

Der abrupte Anstieg war so nicht erwartet worden, da von einer wasserdichten Beschichtung an Ober- und Un-



**Bild 25** Sättigungsgrad bei der Messstelle im Düngemittelverteiltertum unter Verwendung von  $rF(T)$  und  $rF(298\text{ K})$  Saturation degree with time for the concrete wall of the fertilizer distribution tower using both RH(T) and RH(298 K)



**Bild 26** Durchschnittlicher Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit im Raum Oslo, Norwegen [19] RH and T charted over 21 years for the out-door environment in the Oslo-area (from ref. [19])

terseite der Decke ausgegangen wurde. Möglicherweise war hier die Abdichtung des Betonhohlraums nicht ganz einwandfrei. Der Effekt der einmaligen Wasserbeaufschlagung ist jedoch äußerst lang anhaltend.

Als letztes sei die Entwicklung von  $rF(298\text{ K})$  und  $SD(298\text{ K})$  für die unbeschichtete Betonwand im Düngemittelverteiltertum diskutiert (Bilder 24 und 25). Hier wird deutlich, dass die standardisierte relative Feuchte im Betonhohlraum mit der umgebenden atmosphärischen Luftfeuchtigkeit korrespondiert (vgl. Bild 24 mit Bild 26). Es scheint, dass hier die Betonfeuchte mit der Umgebung im Ausgleich steht (Ausgleichsfeuchte). Der starke Anstieg in  $rF(298\text{ K})$  respektive  $SD(298\text{ K})$  am 12. Oktober 2000 ist wiederum auf einen Waschvorgang zurückzuführen. Nach diesem Vorgang dauerte es sichtlich ein halbes Jahr, bis der Ausgleich mit der Umgebungsatmosphäre wieder erreicht wurde.

## 6 Schlussfolgerungen

Für die Erfassung des Wassersättigungsgrads von Beton mithilfe von in Betonhohlräumen eingebrachten hygrometrischen Sensoren ist die Anwendung der thermodynamischen Gesetze unabdingbar. Basierend auf den theoretischen Ableitungen und den praktischen Messresultaten können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die im Betonhohlraum gemessene Luftfeuchtigkeit ist stark von der Temperatur zum Messzeitpunkt abhängig. Messungen von  $rF$  im Betonbohrloch sollen daher unbedingt gemeinsam mit Temperaturmessungen erfolgen.
- Die Umwandlung der Messwerte für die relative Feuchte  $rF(T)$  in standardisierte Werte  $rF(298\text{ K})$  erlaubt die Berechnung des Wassersättigungsgrads von Beton. Dazu ist jedoch die Kenntnis der Adsorptionsisotherme nötig.
- Zur Berechnung des Sättigungsgrads musste eine charakteristische Temperatur  $T_\chi$  eingeführt werden, wel-

che theoretisch der kritischen Temperatur des Wassers entsprechen soll. Optimal erwies sich aber ein Wert von  $T_\chi = 350\text{ K}$ .

- Der Wassersättigungsgrad von beschichteten Betonbauteilen (abhängig von der Dichtigkeit der Beschichtung) bleibt nahezu konstant, auch wenn sich die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung während Tag/Nacht-Zyklen und jahreszeitlich stark ändert.
- Der Sättigungsgrad bzw. die im Bohrloch gemessene standardisierte relative Feuchte von unbeschichteten, nicht bewitterten Betonbauteilen steht im Ausgleich mit der relativen Luftfeuchtigkeit der umgebenden Atmosphäre – zumindest für jahreszeitliche Schwankungen.

## Dank

Der Fa. Protector a.s., Norwegen sei gedankt, dass sie die Durchführung der Arbeiten ermöglichte. Ebenfalls gedankt sei Herrn Prof. emeritus O. E. GJØRV für die kritische Durchsicht.

## Literatur

- [1] STEFFENS, A.; DINKLER D.; AHRENS, H.: Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. *Cement and Concrete Research* 32 (2002), S. 935–941.
- [2] KROPP J.; HILSDORF H. K. (editors): *Performance Criteria for Concrete Durability*. Rilem Report 12, Kapitel 6. E&FN SPON 1995, ISBN-10 0419198806.
- [3] LÓPEZ, W.; GONZÁLEZ J. A.: Influence of the Degree of Pore Saturation on the Resistivity of Concrete and the Corrosion Rate of Steel in Concrete. *Cement and Concrete Research* 23 (1993), S. 368–376.
- [4] SELLEVOLD, E. J.: Resistivity and Humidity Measurements of Repaired and Non-Repaired Areas in Gimsøystraumen Bridge. *Proceedings, International Conference on Repair of Concrete Structures – From Theory to Practice in a Marine Environment*, ed. by A. BLANKVOLL, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, 1997, S. 283–295.
- [5] NILSSON, L.-O.: Assessing Moisture Conditions in Marine Concrete Structures. *Proceedings, International Conference on Repair of Concrete Structures – From Theory to Practice in a Marine Environment*, ed. by A. BLANKVOLL, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo, 1997, S. 273–282.
- [6] SJÖBERG, A.: Accuracy of Moisture Measurements in Concrete by Use of Capacity Sensors – Assessment of Factors that Affects the Accuracy and How they can be Reduced. *Publication P-98:1*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1998 (in Schwedisch).
- [7] ANDRADE, C.; SARRÍA, J. C.; ALONSO, C.: Relative Humidity in the Interior of Concrete Exposed to Natural and Artificial Weathering. *Cement and Concrete Research* 29 (1999), S. 1249–1259.
- [8] PAROLL, H.; NYKÄNEN, E.: Measurement of Relative Humidity and Temperature in a New Concrete Bridge vs. Laboratory Samples. *Nordic Concrete Research, Publication No. 21*, 1998, S. 103–119.
- [9] *Handbook of Chemistry and Physics*, 71. edition, CRC Press, 1990.
- [10] SELLEVOLD, E. J.: OFU Gimsøystraumen Bridge: Moisture Conditions in the Concrete. Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Department of Structural Engineering, Trondheim, Report S-96-043, 1997 (in Norwegisch).
- [11] KORTÜM, G.; LACHMANN, H.: Einführung in die Chemische Thermodynamik. Verlag Chemie Weinheim, 1981, S. 380–382.
- [12] ADOLPHS, J.; SETZER, M. J.: A Model to Describe Adsorption Isotherms. *Journal of Colloid and Interface Science* 180 (1996), S. 70–76.
- [13] ADOLPHS, J.; SETZER, M. J.: Energetic Classification of Adsorption Isotherms. *Journal of Colloid and Interface Science* 184 (1996), S. 443–448.
- [14] ADOLPHS, J.; SETZER, M. J.: Description of Gas Adsorption Isotherms on Porous and Dispersed Systems with the Excess Surface Work Model. *Journal of Colloid and Interface Science* 207 (1998), S. 349–354.
- [15] PRUCKNER, F.: Diagnosis and Protection of Corroding Steel in Concrete. Dr.-Ing. Thesis 2002:140, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Department of Structural Engineering, Trondheim, 2002.
- [16] SELLEVOLD, E. J.: Doctoral course 37989 „Concrete Structure“. fall 1994, NTNU, Trondheim.
- [17] RAMACHANDRAN, V. S.; FELDMAN, R. F.: *Cement Science, Concrete Admixture Handbook – Properties, Science and Technology*. ed. by V.S. RAMACHANDRAN, Noyes Publications, 1984, S. 1–53.
- [18] GONZÁLEZ, J. A.; LÓPEZ, W.; RODRÍGUEZ, P.: Effects of Moisture Availability on Corrosion Kinetics of Steel Embedded in Concrete. *Corrosion* 49 (1993), S. 1004–1010.
- [19] Washington Post, International Station Meteorological Climate Summary, Version 4.0, [http://www.washingtonpost.com/wp-srv/weather/longterm/historical/data/oslo\\_norway.htm](http://www.washingtonpost.com/wp-srv/weather/longterm/historical/data/oslo_norway.htm).

## Autor



Dr.rer.nat. Dr.-Ing. Franz Pruckner  
 PP engineering GmbH  
 Wassergasse 33/1  
 3324 Euratsfeld, Österreich  
 fp@pp-engineering.com