

Untersuchung des Feuchtetransports in einem Beton des SNR-300 durch Neutronentransmission Moisture transport in a concrete of the SNR-300 investigated by neutron transmission

Anton Zeilinger Atominstitut der österreichischen Universitäten, Wien, Österreich

Roland Hübner Interatom, Internationale Atomreaktorbau GmbH, Bensberg bei Köln

Herrn o. Prof. Dr. Gustav Ortner zum 75. Geburtstag gewidmet.

Abstract

Temperature gradients cause a migration of the moisture in concrete. This migration was investigated by neutron radiography and by measuring the count rate of the transmitted neutrons. The use of thermal neutrons yields a better spatial resolution and a higher accuracy than the use of fast neu-

trons. The parameters vapour diffusion coefficient, mass transfer coefficient of the vapour and porosity of the concrete were determined from the profiles of moisture distribution. These parameters are to be used in models for determining the performance of the concrete of the containment of the SNR-300 in the event of a hypothetical accident.

1. Einleitung

Der natriumgekühlte schnelle Brutreaktor SNR-300, der sich derzeit in Bau befindet [1], ist mit zahlreichen redundant ausgelegten Sicherheitssystemen ausgestattet [2]. Darüber hinaus wird besonderes Augenmerk auf den hypothetischen Störfall einer prompt kritischen Exkursion gelegt. Für diesen Fall nimmt das Sicherheitskonzept eine teilweise Zerstörung der Brennelemente und das Auftreten von Natriumdampf innerhalb des Reaktortanks an.

Die mechanischen Eigenschaften des Reaktortanks und das Notkühlsystem sind so ausgelegt, daß sie Schäden des Primärsystems verhindern. Darüber hinaus ist der Reaktor mit einem Containmentsystem ausgestattet, das u. a. eine weitere Sicherheitsbarriere für den hypothetischen Fall einer Leckage am Primärsystem bildet. Das innere Containment umfaßt alle Teile des Primärkreises und den Druckentlastungsraum. Die Dicke der Wand des inneren Containments liegt in der Gegend von 1 m. Bei einem hypothetischen Störfall können größere Mengen Natriumdampf in das innere Containment entweichen. Da dann ein Reventing-Betrieb vom äußeren zum inneren Containment aufgenommen wird, um eine Abgabe von Aktivität zu unterbinden, steigt der Druck im Containmentsystem an. Sobald der Druck im äußeren Containment den Auslegungsdruck erreicht hat, wird Gas an die Umgebung abgegeben. Ein Problem stellt die Tatsache dar, daß durch die hohe Temperatur, die am Beton des inneren Containments im Störfall anliegt, ein Austreiben von Wasserdampf aus dem Beton auftreten kann. Dies könnte zu einem zu raschen und zu großen Druckanstieg führen.

Zur Festlegung von Parametern in Modellrechnungen wurde die räumliche und zeitliche Änderung der Wasserverteilung im Beton bei Anliegen eines Temperaturgradienten gemessen. Um den experimentellen Aufwand gering zu halten, wurde nach einer zerstörungsfreien Methode gesucht. Keine der existierenden experimentellen Methoden der Feuchtebestimmung in Beton [3] erfüllt jedoch gleichzeitig die folgenden Forderungen:

1. Temperaturunabhängigkeit,
2. kontinuierliche Messung der Verteilung der Feuchte innerhalb des Betonblocks,
3. Ortsauflösung besser als 5 mm.

So erfüllt zum Beispiel die Bestimmung der Feuchtigkeit mit Hilfe schneller Neutronen [4] wegen des hohen Fermialters sicher nicht die Bedingung 3.

Die Zusammensetzung des zu untersuchenden Betons lautet

Zement (HOZ 3501)	260 kg/m ³
Wasser	160 kg/m ³
Sand (0 . . . 4 mm)	686 kg/m ³
Basalt-Splitt (8 . . . 11 mm)	891 kg/m ³
Kies (16 . . . 31,5 mm)	371 kg/m ³
Füller WDI Typ 45	80 kg/m ³

1. Introduction

The sodium-cooled fast breeder reactor SNR-300, currently under construction [1], is equipped with several redundantly duplicated safety systems [2]. In addition, particular attention is paid to the hypothetical accident involving a promptly critical excursion. The safety concept of the SNR-300 assumes for such an event a partial destruction of the fuel assemblies and escape of sodium vapour into the reactor tank.

The mechanical properties of the reactor tank and of the emergency cooling system are such that, normally, major damage to the primary system is prevented. In addition, the reactor is equipped with a containment system which, amongst its other functions, forms a further safety barrier in the hypothetical event of a primary system leak. The inner containment encloses all the parts of the primary system and the pressure-relief chamber. The wall thickness of the inner containment is about 1 m. In the event of a hypothetical accident, larger quantities of sodium vapour may escape into the inner containment. Furthermore, to prevent any release of activity to the environment in the event of such a hypothetical accident, the containment system is switched over to a re-venting regime from the outer into the inner containment, as a result of which the pressure in the entire containment system increases. When the pressure in the outer containment reaches the design limit, gas is released to the outside. A problem arises in this connection in that, owing to the high temperature to which the concrete of the inner containment is exposed, water vapour may be driven out of this concrete. This might result in an unduly rapid and unduly high increase in pressure.

In the experiments described here the spatial and temporal variation of the moisture distribution in a concrete plate under the effect of a temperature gradient was measured, in order to establish the parameters required for model calculations. In order to minimize the extent of experimental involvement, a non-destructive testing method was sought. However, none of the existing experimental methods for measuring the moisture content of concrete [3] satisfies all three of the requirements listed below:

1. Temperature-independence;
2. Continuous measurement of the moisture distribution in the concrete plate;
3. Spatial resolution better than 5 mm.

For example, measurement of the moisture content with the aid of fast neutrons [4] fails to satisfy condition 3 owing to the high Fermi age.

The concrete to be investigated has the following composition:

2. Meßmethode

Zur Bestimmung der Änderungen im Feuchtegehalt wurde eine Transmissionsmethode thermischer Neutronen gewählt. Diese Methode basiert auf dem hohen Schwächungskoeffizienten von Wasserstoff für thermische Neutronen. Zur Erzielung von Bildern größerer Bereiche diente die Neutronenradiographie [5]. Bei der verwendeten Methode werden die Röntgenfilme in direktem Kontakt mit einem Gadolinium-Konverter gemeinsam im Neutronenstrahl exponiert. Gd sendet auf Neutroneneinfang prompte Konversionselektronen aus, die den Film schwärzen. Das Auflösungsvermögen mit Gd-Folie liegt bei etwa $10\ \mu\text{m}$ [6], die optimale Dicke der Folie bei etwa $25\ \mu\text{m}$ [7]. Es wurde der Röntgenfilm OSRAY TA T4 DW von Agfa-Gevaert verwendet.

Im Prinzip ist es möglich, von Neutronenradiographien quantitative Resultate zu erhalten [8]. Hierbei wird die Firmschwärzung mit einem Mikrodensitometer ausgemessen. Infolge der körnigen Struktur des Betons können jedoch Änderungen zwischen verschiedenen Radiographien nur schwer festgestellt werden. Es wurde daher zusätzlich die Intensität der durch den Beton transmittierten Neutronen mit einem BF_3 -Zählrohr gemessen. Das Zählrohr befand sich hinter einem Schlitzkollimator von 200 mm Länge, der 2 Schlitze von 2 mm Breite und je 6 mm Höhe besaß, die übereinander angeordnet waren.

Zur Eliminierung von Schwankungen der Reaktorleistung wurde dieser Zähler monitorisiert. Die Änderung des Feuchtegehaltes wurde aus den Änderungen der transmittierten Zählrate bestimmt.

3. Meßanordnung

In Vorversuchen wurde die maximale tolerierbare Dicke der Betonplatte bestimmt. Es standen hierfür Proben mit Dicken von 1 cm, 2 cm, 5 cm und 10 cm zur Verfügung. Dies entspricht bei einem Wassergehalt von 15 Volumprozent Wasserschichten von 1,5 mm, 3 mm, 7,5 mm und 15 mm Stärke. Neutronenradiographien dieser Proben zeigten erwartungsgemäß, daß die Detailerkennbarkeit mit zunehmender Dicke stark abnahm. Auf den Radiographien der 10 cm dicken Proben waren wegen der starken Neutronenstreuung nur mehr geringe Schwärzungsunterschiede erkennbar. Es wurde daher mit einer Plattendicke von 5 cm gearbeitet. Für die Platten war eine Wärmeisolation vorzusehen, die vom Neutronenstrahl durchdrungen werden mußte. Das beste Material hierfür ist Teflon wegen seiner chemischen Zusammensetzung $(\text{CF}_2)_{11}$.

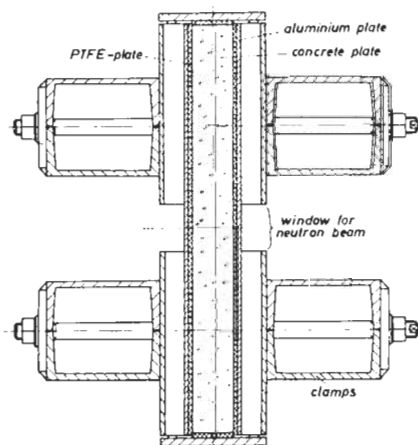


Fig. 1: Spann- und Montagevorrichtung der Betonplatte

Fig. 1: Clamping and mounting device of the concrete plate specimen

Cement (HOZ 350 L)	260 kg/m ³
Water	160 kg/m ³
Sand (0... 4 mm)	686 kg/m ³
Basalt chippings (8... 11 mm)	891 kg/m ³
Gravel (16... 31.5 mm)	371 kg/m ³
Filler WDI type 45	80 kg/m ³

2. Measuring method

The method chosen for determining the changes in the moisture content is based on measuring the transmission of thermal neutrons. It is suitable for this particular purpose because of the high attenuation coefficient of hydrogen for thermal neutrons. Pictures of large areas were obtained by means of neutron radiography [5] using the direct method in which the X-ray film is in direct contact with a gadolinium converter foil and the film and foil are exposed in the neutron beam together. Neutron capture events in the Gd foil generate prompt conversion electrons which blacken the X-ray film. The resolution of the Gd foil is about $10\ \mu\text{m}$ [6], the optimal foil thickness is about $25\ \mu\text{m}$ [7]. The X-ray film used was the Agfa-Gevaert film OSRAY TA T4 DW.

In principle, neutron radiography makes it possible to obtain quantitative results [8] by measuring the blackening of the film with a microdensitometer. In the particular case of concrete, however, owing to the granular texture of the material, it is difficult accurately to detect changes from one radiograph to another. In the experiments described here, therefore, the intensity of the neutron beam transmitted through the concrete was additionally measured with a BF_3 counter tube. The counter tube was located behind a 200 mm long slit collimator with 2 slits, each 2 mm wide and 6 mm high, arranged one above the other.

To eliminate the effects of fluctuations of the reactor power output on the count rate, this counter was monitorised. The changes in the moisture content of the concrete were calculated from the changes in the transmitted count rate.

3. Measuring arrangement

Preliminary experiments were carried out to determine the maximum thickness of the concrete plate at which an acceptable resolution of details can still be achieved. The specimens tested were 1 cm, 2 cm, 5 cm and 10 cm thick. At a moisture content of 15% by volume this corresponds to water layer thicknesses of 1.5 mm, 3 mm, 7.5 mm and 15 mm respectively. As expected, neutron radiographs of these specimens showed a severe loss of detail resolution with increasing thickness, owing to increasingly strong neutron scatter. Thus, the radiographs of the 10 cm thick specimens showed only slight differences in the density of the film blackening. The main experiments were therefore conducted on concrete plates 5 cm thick \times 50 cm long \times 50 cm wide.

The concrete plates had to be thermally insulated on both faces. The most suitable insulating material for this purpose is Teflon, owing to its chemical composition $(\text{CF}_2)_{11}$. The Teflon plates were 5 mm thick (on each face of the specimen). In addition, in order to prevent any escape of water vapour from the two faces and to hinder moisture motion between concrete and Teflon, the insulated concrete plates were tightly clamped between two aluminium plates (Fig. 1). The complete sandwich traversed by the neutron beam thus consisted of 5 mm aluminium, 5 mm Teflon, 5 cm concrete, 5 mm Teflon, 5 mm aluminium. The concrete plate was equipped with several cast-in thermocouples. It was heated along one edge by means of a radiation heater, and the temperature at that edge was kept constant at $(170 \pm 4)^\circ\text{C}$. The tempera-

Die Plattendicke betrug 5 mm auf jeder Seite. Um den Gegen-
druck zum Dampfdruck des Wasserdampfes aus dem Beton
zu erzeugen und um Feuchtwanderung entlang der Beton-
Teflon-Grenzfläche zu verhindern, wurden die Betonplatten
(Größe 50 cm × 50 cm × 5 cm) zwischen zwei Al-Platten fest
eingespannt (Fig. 1). Der Neutronenstrahl trat also nachein-
ander durch folgende Schichten: 5 mm Al, 5 mm Teflon, 5 cm
Beton, 5 mm Teflon, 5 mm Al. Die Betonplatte war mit zahl-
reichen eingegossenen Thermoelementen versehen. An einer
Schmalseite wurde die Betonplatte mit einem Strahlungs-
heizer aufgeheizt und die Temperatur auf $(170 \pm 4)^\circ\text{C}$ kon-
stant gehalten. Das Temperaturprofil, das sich in der Mitte
einstellte, ist in Fig. 2 dargestellt.

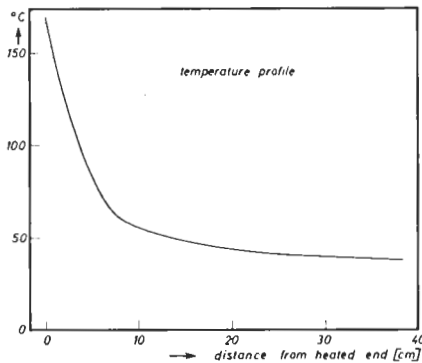


Fig. 2: Temperaturprofil in der Mitte der Betonplatte im Gleichgewicht

Fig. 2: Temperature profile in the median plane of the concrete plate at equilibrium

Die Gleichgewichtstemperatur war für Thermoelemente nahe
der beheizten Seite nach 1 Stunde erreicht. Für sämtliche
Thermoelemente war dies spätestens nach 4 Stunden der Fall.
Die instrumentierte Platte konnte auf einem Wagen vor dem
Strahlrohr hin- und herbewegt werden. Auf Fig. 3 ist die An-
ordnung am Reaktor dargestellt. Zur Ausfilterung der Gam-
mastrahlung wurde ein 8 cm dicker Wismutfilter im Strahl-
rohr angebracht. Der konische Kollimator besaß am inneren
Ende einen Durchmesser von 17 mm. Dies ist gleichzeitig die
Größe der Neutronenquelle. Es konnten zugleich 2 Blöcke
gemessen werden. Der gerade nicht gemessene Block wurde
dabei ganz aus dem Strahl herausgefahren. Die beiden Be-
tonplatten waren 3800 bzw. 2980 mm vom inneren Ende des
Kollimators entfernt. Die Entfernung der Filmhaltungen von
den Betonplatten betrug 35 cm. Die Entfernung des Zählrohr-
kollimators von den Betonplatten betrug 40 bzw. 122 cm. Da-
durch wurde erreicht, daß der Anteil der gestreuten Neutronen,
die das Zählrohr erreichen, gering ist [9]. Es wurden ab-
wechselnd Neutronenradiographien angefertigt und die Mes-
sung der Transmissionszählrate durchgeführt.

4. Kalibrierung der Methode

Aus der Intensität des transmittierten Neutronenstrahls wurde
die Veränderung der Wasserkonzentration bestimmt. Da er-
stens der verwendete Neutronenstrahl polychromatisch und
sein Spektrum nicht genau bekannt ist und zweitens in stark
wasserstoffhaltigen Substanzen wegen des hohen Streuquer-
schnittes von Wasserstoff Mehrfachstreuung auftritt, mußten
Kalibrierungsmessungen durchgeführt werden. Nach Test-
messungen mit Plexiglasplatten wurden Messungen mit Was-
ser-Standards (flachen Wasserbehältern aus Al) durchge-
führt.

In diesen Behältern bildet das Wasser eine dünne Schicht von
90 mm × 105 mm Größe und Dicken von 0,95, 1,99, 3,00 und

ture profile which became established along the median
plane at equilibrium is shown in Fig. 2.

The thermocouple readings showed that a steady tempera-
ture was reached near the heated edge within 1 hour and
throughout the plate within 4 hours. The instrumented plate
was mounted on a trolley and could be moved back and forth
in front of the beam tube. The overall arrangement at the
reactor is shown in Fig. 3. The gamma radiation was filtered
out of the neutron beam by means of an 8 cm thick bismuth
filter at the inlet of the beam tube. The diameter of the inlet
end of the conical collimator was 17 mm, this being the ef-
fective size of the neutron source. The arrangement accom-
modated two trolley-mounted concrete specimen blocks of
which either could be entirely withdrawn from the neutron
beam whilst measurements were carried out on the other. The
distance between the inlet of the conical collimator and the
inlet of the slit collimator of the counter tube was 4200 mm.
The first block was located at a distance of 2980 mm from the
first of these two inlets and of 1220 mm from the second; the
corresponding distances for the second block were 3800 mm
and 400 mm, respectively. This arrangement ensured that the
proportion of scattered neutrons reaching the counter tube
was small [9]. The film holders were at a distance of 350 mm
on either side of each specimen plate. All the above dis-
tances refer to the median plane of each specimen plate.
Neutron radiography was alternated with count rate meas-
urements of the transmitted neutrons.

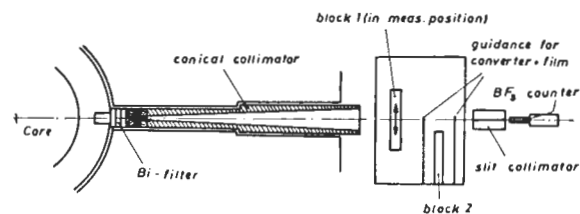


Fig. 3: Meßaufbau am Strahlrohr

Fig. 3: Beam tube and measuring arrangement

4. Calibration

The changes in the moisture content of the concrete were
calculated from the changes in the measured intensity of the
transmitted neutron beam. Bearing in mind, firstly, that the
neutron beam used in these experiments was polychromatic
and its exact spectrum was unknown and, secondly, that neu-
trons passing through substances with a high hydrogen con-
tent undergo multiple scatter owing to the large neutron-
scattering cross-section of hydrogen, it was necessary to
carry out calibration measurements.

These measurements were preceded by test measurements
using Plexiglass sheets. The actual calibration measurements
were carried out with thin 90 mm × 105 mm aluminium cali-
bration containers filled with water; four different types of
containers were used, with water layer thicknesses of 0.95,
1.99, 3.00 and 3.92 mm respectively. These containers were
introduced into the neutron beam at various positions of
each plate in the beam, and their effects on the neutron
transmission were determined.

The parameter used was the reduced count rate, i.e., the
actual transmission count rate divided by the monitor count
rate. The calibration was based on the attenuation caused by
the water in the containers, i.e., on the ratio of the reduced
count rate with a given water-filled container to that with an
empty container. These measurements were carried out on

3,92 mm. Diese Behälter wurden zusätzlich zu den Betonblöcken in den Strahl gebracht, und der Einfluß dieser Wasserschichten wurde bei verschiedenen Positionen beider Blöcke ermittelt.

Zur Kalibrierung wurde die Abschwächung durch die Wasserschichten aus der reduzierten Zählrate (Transmissionszählrate/Monitorzählrate) und deren Verhältnis zur reduzierten Zählrate ohne Wasser-Standard bestimmt. Gemessen wurde bei beiden Blöcken nach längeren Aufheizzeiten an jeder Position zumindest mit der Wasser-Dicke, die der bis dahin ausgetriebenen Wasser-Menge am ehesten entsprach. Im Idealfall würde gelten

$$I = I_0 \cdot e^{-\Sigma d} \quad (1)$$

Dabei ist

I_0 die Intensität des Neutronenstrahls ohne H_2O ,
 I die Intensität des Neutronenstrahls mit H_2O ,
 Σ der totale makroskopische Wirkungsquerschnitt,
 d die Schichtdicke.

Das heißt in unserem Fall

$$\ln \frac{(Z/M)_o}{(Z/M)_m} = -\Sigma d \quad (2)$$

Dabei ist

Z die Transmissionszählrate,
 M die Zählrate des Monitors;
 m bedeutet mit Wasser (Al berücksichtigt), o ohne Wasser.

Da in Wasser eine starke Streuung der Neutronen auftritt, gilt das Exponentialgesetz nur in engen Grenzen. Es ist vielmehr anstelle von Σ eine Größe Σ_w zu setzen, die von der Menge des Wassers abhängt, das sich bereits im Strahl befindet.

Es wurde für die folgende Auswertung angenommen, daß die Schwächung des Neutronenstrahls durch den Beton zum überwiegenden Teil vom Gesamtwassergehalt verursacht wird. Es liegt daher eine Abhängigkeit des Einflusses der Wasserschichten auf die Neutronentransmission von der Transmission ohne Wasser-Schicht vor.

In Fig. 4 ist die Schwächung des Neutronenstrahls durch die Wasserschichten logarithmisch gegen die reduzierte Transmissionszählrate ohne Wasserschicht aufgetragen. Der Einfluß von weiteren Wassermengen im Strahl ist um so geringer, je mehr Wasser sich bereits im Strahl befindet, d. h., je höher der Wassergehalt des Betons ist. Bemerkenswert ist, daß die Punkte unabhängig von der durchstrahlten Stelle des Betonblocks aufgetragen wurden. Für eine bestimmte Transmission konnte jedoch mit hinreichender Genauigkeit ein exponentielles Schwächungsgesetz angenommen werden.

Weitere Testmessungen ergaben, daß es für das Meßergebnis unerheblich ist, ob sich die Behälter zur Kalibrierung vor oder hinter dem Betonblock befanden. Es zeigte sich hier ein maximaler Unterschied von 1,8%.

Schätzt man die Genauigkeit der Meßergebnisse ab, so erhält man für den Meßfehler der Wasserkonzentrationsänderungen 0,3 Volumprozent.

Eine wesentliche Verfälschung der Meßmethode würde auftreten, wenn mit dem Wasser Substanzen mitwandern, die ebenfalls einen hohen Neutronenschwächungskoeffizienten aufweisen. Um dies auszuschließen, wurde eine Aktivierungsanalyse von aus dem Beton extrahiertem Wasser durchgeführt, die keine Anzeichen in dieser Richtung ergab.

5. Experimentelle Ergebnisse

Fig. 5 und 6 zeigen zwei Neutronenradiographien des Betons zu verschiedenen Zeiten nach Heizbeginn. Stellen größerer Schwärzung sind Stellen höherer Neutronentransmission. Die

both concrete specimens after a long heating time, using in each position at least one container with a water layer thickness corresponding most closely to the quantity of water already lost by the concrete at the point concerned. In the ideal case the calibration equation would be

$$I = I_0 \cdot e^{-\Sigma d} \quad (1)$$

Here

I_0 is the intensity of the neutron beam without water,
 I is the intensity of the neutron beam with water,
 Σ is the total macroscopic cross-section,
 d is the layer thickness.

Converted to the measured count rates, the above equation becomes

$$\ln \frac{(Z/M)_o}{(Z/M)_m} = -\Sigma d \quad (2)$$

Here

Z is the transmission count rate,
 M is the count rate of the monitor,
 m and o stand for "with water-filled container" (taking the aluminium also into account) and "without container", respectively.

Owing to the strong scatter of neutrons in water, the above exponential law is valid only within narrow limits and it is therefore preferable to replace Σ by a quantity Σ_w which depends on the quantity of water already in the path of the neutron beam. It was assumed in these experiments that the attenuation of the neutron beam by the concrete is caused predominantly by the total water content in the concrete. It follows that the effects of additional water layers on the neutron transmission depend on the transmission without any additional water layer.

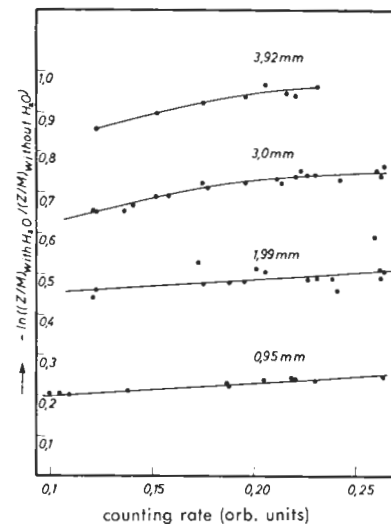


Fig. 4: Schwächung des Neutronenstrahls durch zusätzliches Wasser im Strahlengang als Funktion der Transmission

Fig. 4: Attenuation of the neutron beam by additional water placed in the beam path, plotted against the count rate without additional water

Fig. 4 shows the attenuation of the neutron beam by additional water layers, plotted on a logarithmic scale against the reduced count rate without a water layer, plotted on a linear scale. The graphs have a rising trend with increasing count rate. This shows that the greater the quantity of water already in the neutron beam, i.e., the higher the moisture content of the concrete (low reduced count rate), the smaller the effect of additional quantities of water in the beam. However, comparing the four graphs to each other, it can be seen that the exponential attenuation law is valid with sufficient

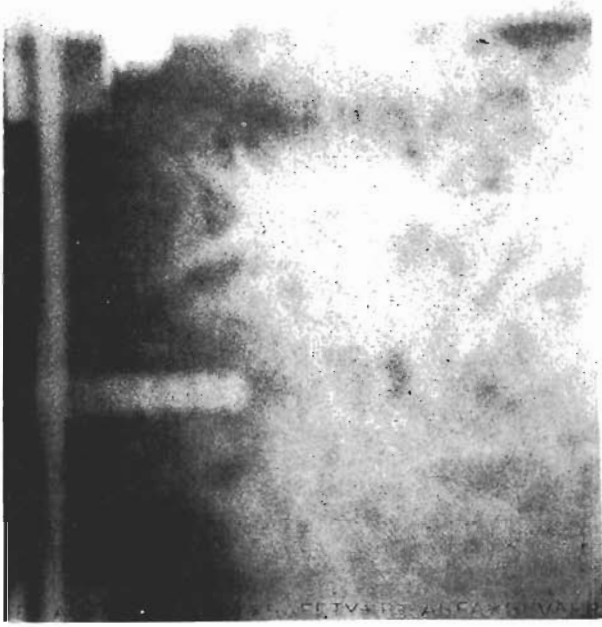


Fig. 5: Neutronenradiographie vom beheizten Ende der Betonplatte, 3 h 15 min nach Heizbeginn aufgenommen. Negativ, dunkle Stellen zeigen höhere Neutronentransmission und damit bereits geringeren Feuchtegehalt
 Fig. 5: Neutron radiograph (negative) starting from the heated edge of the concrete specimen, 3h 15m after the start of heating. The darker areas show a higher neutron transmission and thus a lower moisture content

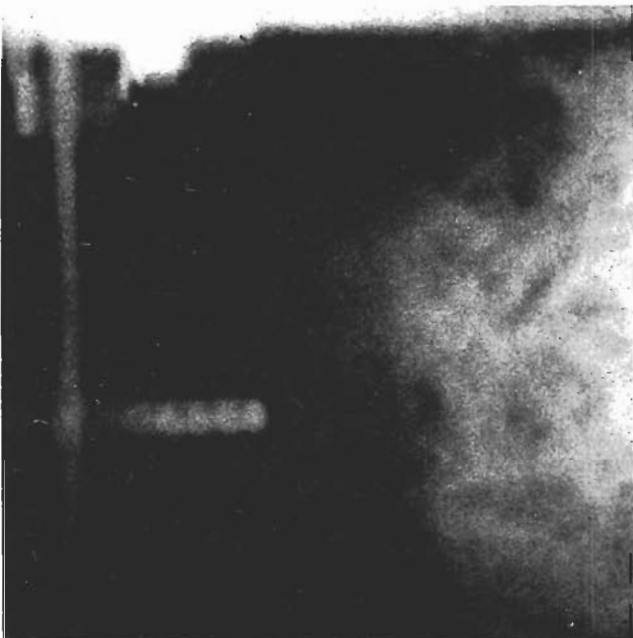


Fig. 6: Neutronenradiographie vom beheizten Ende der Betonplatte 251 h nach Heizbeginn
 Fig. 6: Neutron radiograph starting from the heated edge of the concrete, 251 h after the start of heating

aufgeheizte Seite des Betons befindet sich an der links zu erkennenden Kante. Man sieht deutlich, daß mit zunehmender Heizzeit das Wasser aus einer immer dicker werdenden Schicht an der Oberfläche ausgetrieben wird.

Die Abhängigkeit der ausgetriebenen Feuchte von der Entfernung der Meßstelle vom geheizten Ende zu verschiedenen Heizzeiten (Fig. 7) zeigt klar die Wanderung des Wassers. In Fig. 7 sind 4 charakteristische von 15 gemessenen Profilen dargestellt. Im tieferen Bereich ist wegen der Kondensation

accuracy for any one value of the reduced transmission count rate. It is noteworthy that the measured points shown are plotted independently of geometric locations of the corresponding points of the concrete specimen.

Further measurements showed that the measured results are not significantly affected by whether the calibration container is placed in front of or behind the concrete specimen, the maximum difference found in this respect being of the order of 1.8%. The measurement error in respect of the changes in the moisture content was assessed at about 0.3% by volume.

The results obtained by this method could be vitiated substantially if the migrating water were to entrain other substances which would also have a high neutron attenuation coefficient. An activation analysis of the water extracted from the concrete was therefore carried out and showed no indication of such an effect.

5. Experimental results

Fig. 5 and 6 show two neutron radiographs of the concrete at two different times after the beginning of heating. The darker areas are areas with a higher neutron transmission, i.e., areas with a lower moisture content in the concrete. The heated edge of the concrete plate is the left hand edge in the radiographs. It can clearly be seen that the width of the marginal zone from which the water is driven out increases with the heating time.

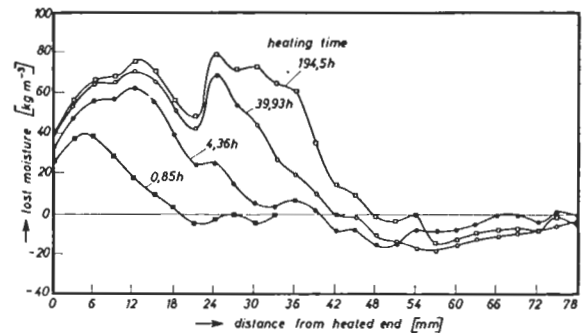


Fig. 7: Vier charakteristische Profile der aus der Betonplatte ausgetriebenen Feuchte als Funktion vom Abstand von der beheizten Fläche zu verschiedenen Zeiten nach Heizbeginn
 Fig. 7: Four characteristic profiles of the moisture distribution in the concrete specimen plate at various times after the beginning of heating, plotted against the distance from the heated edge

The migration of the water is clearly illustrated in Fig. 7 which shows the loss of moisture plotted against the distance from the heated edge at various heating times. Here 4 characteristic profiles of 15 measured profiles are shown. Further along the specimen there is an increase in the moisture content, owing to condensation of water vapour. The heating times shown are valid exactly only for the first measurement of each series, taken at the heated edge itself. The points further along were mapped consecutively, with a time lag of 7 minutes per point. A simple interpolation shows, however, that the resulting inaccuracies are small. The baseline corresponds to the moisture content distribution before heating.

Fig. 8 shows the moisture content at two points, plotted against the heating time. It can be seen that at the point nearest to the heated edge (15 mm) the loss of moisture started quite soon after the beginning of heating, but an equilibrium was not reached even after 200 hours of heating. At the point further away from the heated edge (54 mm) there was an initial increase in the moisture content, followed by a subsequent decrease. The equilibrium temperature at the 15 mm point was about 130 °C whereas at the 54 mm point it was about 80 °C.

von Dampf ein Anstieg des Wassergehalts zu beobachten. Die angegebenen Meßzeiten gelten exakt nur für die erste Messung an der beheizten Stelle, die anderen Punkte wurden jeweils 7 Minuten später gemessen. Einfache Interpolation zeigt jedoch, daß die Abweichungen gering sind. Die Nulllinie entspricht der Feuchteverteilung vor dem Aufheizen.

Betrachtet man den Feuchtegehalt als Funktion der Zeit (Fig. 8), so erkennt man, daß an Stellen nahe der beheizten Fläche der Austrocknungsvorgang bald beginnt. Jedoch ist selbst nach Heizzeiten von etwa 200 Stunden noch kein Gleichgewicht erreicht. An tieferliegenden Stellen ist anfangs eine Zunahme des Wassergehaltes zu beobachten, gefolgt von einer späteren Abnahme. Die Stelle 15 mm unter der beheizten Fläche hatte eine Gleichgewichtstemperatur von etwa 130 °C, die bei 54 mm etwa 80 °C.

6. Berechnung von Parametern

Zweidimensionale Testrechnungen zur Wärmeleitung zeigten, daß von der Betonmitte zum Betonrand der mit Teflon isoliert war, Temperaturunterschiede bis etwa 3 K auftreten. Diese können für die Feuchtebewegung vernachlässigt werden. Es konnte daher sowohl für die Wärmeleitung als auch für die Dampfdiffusion eindimensional gerechnet werden. In der Wärmeleitungsgleichung wurde jedoch ein Korrekturterm eingeführt, der die seitlichen Wärmeverluste durch das Teflon hindurch berücksichtigt.

Die Diffusionsgleichung lautet daher

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho(x, t)}{\partial x^2} + q(x, t) \quad (3)$$

(ρ Dampfdichte, D Dampfdiffusionskoeffizient, q Quellterm).

Wegen der Porosität des Betons gilt

$$q \cdot \psi = Q \quad (4)$$

(Q Verdampfungs- oder Kondensationsrate, ψ Porosität (Volumen der Poren/Gesamt volumen des Betons)). Die Randbedingung wird durch eine Massenübergangsgleichung beschrieben:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \beta \psi (\rho_s - \rho_e) \quad (5)$$

(β Massenübergangskoeffizient, ρ_s Dampfdichte in der beheizten Fläche des Betons, ρ_e Dampfdichte im umgebenden Luftraum). Die Anfangsbedingung ist einfach der Gleichgewichtszustand entsprechend der Anfangstemperatur des Betons. Für die Wärmeleitungsgleichung gilt

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r_w}{\rho c} q - 2 \frac{\gamma}{\rho c} (T - T_0) \quad (6)$$

(T Temperatur des Betons, λ Wärmeleitfähigkeit des Betons, c spezifische Wärme des Betons, r_w Verdampfungswärme des Wassers, ρ Betondichte, γ Wärmeübergangskoeffizient [seitlich durch Teflon], T_0 Temperatur an der Oberfläche). Der zweite Term auf der rechten Seite beschreibt die Wärmemenge, die zur Verdunstung des Wassers notwendig ist, der letzte Term stellt den Wärmeverlust durch die Teflonisolierung hindurch dar. Die Randbedingung hier ist die geregelte Temperatur am heißen Ende der Betonplatte. Zur Auswertung wurden die für die Wärmeleitungsgleichung notwendigen Parameter an einem im Aufbau nahezu identischen Beton bestimmt. Die Differentialgleichungen wurden auf einem numerischen Computer unter Verwendung eines Differenzenver-

6. Calculation of parameters

Two-dimensional test calculations of the heat conduction showed temperature differences of up to about 3 K between the median plane of the specimen and the two faces insulated with Teflon. These differences may be neglected as far as the migration of moisture is concerned. The calculations of both the heat conduction and the vapour diffusion were therefore carried out one-dimensionally, with a correction term in the heat conduction equation to take into account the lateral heat losses through the Teflon insulation.

The diffusion equation is therefore

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho(x, t)}{\partial x^2} + q(x, t) \quad (3)$$

where ρ is the density of the water vapour, D is the diffusion coefficient of the vapour and q is a source term. Owing to the porosity of the concrete we may write

$$q \cdot \psi = Q \quad (4)$$

where Q is the rate of evaporation or condensation and ψ is the porosity factor defined as the ratio of the total volume of the pores to the total volume of the concrete.

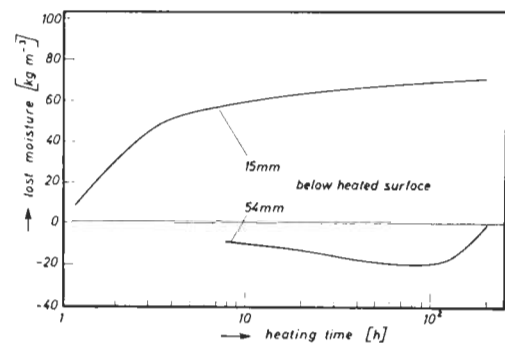


Fig. 8: Verlauf der ausgetriebenen Feuchte in Abhängigkeit von der Heizzeit in 2 verschiedenen Abständen von der beheizten Fläche

Fig. 8: Time course of the moisture content at two points at different distances from the heated edge

The boundary condition is described by the following mass transfer equation

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \beta \psi (\rho_s - \rho_e) \quad (5)$$

where β is the mass transfer coefficient, ρ_s is the density of the water vapour in the boundary layer of concrete and ρ_e is the density of the vapour in the surrounding air space. The initial condition is simply the equilibrium state corresponding to the initial temperature of the concrete.

The heat conduction equation may be written

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r_w}{\rho c} q - 2 \frac{\gamma}{\rho c} (T - T_0) \quad (6)$$

where T is the temperature of the concrete, λ is the thermal conductivity of the concrete, c is the specific heat of the concrete, r_w is the heat of evaporation of the water, ρ is the density of the concrete, γ is the heat transfer coefficient (laterally through the Teflon) and T_0 is the temperature of the concrete-Teflon interface.

fahrens (Crank-Nicholson [10]) gelöst. Der Vergleich der Lösungen der Wärmeleitungsgleichung mit dem tatsächlich erhaltenen Profil brachte eine Absicherung der verwendeten Werte für q .

Aus den Ausdampfzeiten zu kleineren Zeiten konnte der Massenübergangskoeffizient des Dampfes zu 0,15 m/h bestimmt werden. Die Bestimmung des Diffusionskoeffizienten D und der Porosität ψ erfolgte schließlich durch Lösung der Gl. (3) und (5) für ein gegebenes Paar von D und ψ und nachträgliche Veränderung dieser Parameter bis zur optimalen Übereinstimmung der berechneten Ausdampfzeit mit der durch Integration der Meßkurven bestimmten. Als beste Werte wurden erhalten $D = 0,0015 \text{ m}^2/\text{h}$ und $\psi = 0,15$. Diese Werte liegen innerhalb der zu erwartenden Grenzen (vgl. z. B. [11]).

7. Schluß

Die verwendete Methode unterscheidet sich grundsätzlich von dem Verfahren der Feuchtebestimmung mittels schneller Neutronen. Ein wesentlicher Vorteil ist die hohe Ortsauflösung und die viel weitergehende Unabhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung des Untersuchungsmaterials. Jedoch kommt das Transmissionsverfahren thermischer Neutronen wohl hauptsächlich für dynamische Vorgänge, bei denen sich der Feuchtegehalt mit der Zeit ändert, in Frage.

Die gewonnenen Ergebnisse stellen eine Grundlage für quantitative Aussagen dar, wie sie zur Beurteilung von Containmentbelastungen aus hypothetischen Störfällen benötigt werden. Die Übertragung auf die Störfallsituation erfolgt dann mit theoretischen Modellen, wobei die hier experimentell bestimmten Materialkonstanten benützt werden.

(Eingegangen am 1. 9. 1975)

Literatur - References

- [1] »De-Benelux« SNR-300. Atomwirtschaft 17 (1972) Heft 7
- [2] Brandstetter, A., H. Hübel: Sicherheitskonzept und zugehörige Konstruktionsmerkmale des SNR-300. Atomwirtschaft 17 (1972) 371
- [3] Götz, A.: Zur Feuchtemessung im Beton. Materialprüfung 15 (1973) 95
- [4] Mlitz, P., R. Neider: Zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Baustoffen mit Hilfe von Neutronen. Die Bautechnik 3 (1967) 77
- [5] Berger, H.: Neutron Radiography. Amsterdam, London, New York: Elsevier Publishing Company 1965
- [6] Berger, H.: Resolution study of Photographic Thermal Neutron Image Detectors. J. Appl. Phys. 34 (1963) 4
- [7] Müllner, M., H. Jex: Converter-thickness for optimum intensity in neutron-radiography. Nucl. Inst. Met. 103 (1972) 229
- [8] Mannousakis, M., H. Rauch, A. Zeilinger: Investigation of hydrogen motion in liquids by neutron radiography. Proc. BNES Conf. on Radiography with Neutrons, Birmingham 1973

In the above equation the second term on the right hand side describes the quantity of heat required for the evaporation of the water, and the last term represents the loss of heat through the Teflon insulation. The boundary condition for this equation is the controlled temperature at the heated edge of the concrete specimen. For the purpose of evaluation the parameters required for Eq. (6) were determined on a concrete with an almost identical composition. The differential equations were solved on a numerical computer using a finite difference method (Crank-Nicholson [10]). The comparison of the solutions of the heat conduction equation with the actually measured profile provided a check of the values used for q .

The evaporation rates at short heating times yielded for the mass transfer coefficient of the vapour the value $\beta=0.15 \text{ m/h}$. Finally, the diffusion coefficient D and the porosity ψ were calculated by solving Eqs. (3) and (5) for a given pair of values of D and ψ and then varying these parameters until an optimal agreement was achieved between the calculated evaporation rate and that determined by integration of the measured curves. The best fit was obtained with $D = 0.0015 \text{ m}^2/\text{h}$ and $\psi = 0.15$. These values are within the expected limits (see, for example, [11]).

7. Conclusion

The method used differs fundamentally from the method of moisture determination by means of fast neutrons. Important advantages are the high spatial resolution and the much greater independence of the findings from the chemical composition of the material investigated. On the other hand, the method based on the transmission of thermal neutrons can effectively be used for studying dynamic processes in which the moisture content changes with time.

The results obtained provide a basis for quantitative predictions required for the assessment of the thermal and mechanical loads exerted on the containment arising in the event of hypothetical accidents. Such containment stress studies can be carried out with the aid of theoretical models using the experimentally determined material constants reported in this paper.

- [9] Barton, J. P.: Contrast Sensitivity in Neutron Radiography. Appl. Mat. Res. 1 (1965) 90
- [10] Smith, G. D.: Numerical Solution of Partial Differential Equations. Oxford: University Press 1965
- [11] Brauer, H.: Stoffaustausch. Aarau und Frankfurt: Verlag Sauerländer 1971

