



Neutronen-Computer-Tomographie: Ein wissenschaftliches Verfahren zur punktuellen Erkundung von Hohlräumen in porösem Massenbeton

von Harald Wildner, Ronald Haselsteiner und Burkhard Schillinger

Zusammenfassung

In den vergangenen drei Jahren wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens *Injektionen mit hydraulischen Bindemitteln im porösen Massenbeton* am Lehrstuhl und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich der Injizierbarkeit von Stampfbetonbauwerken durchgeführt. Ein Teilziel des Forschungsvorhabens bestand darin, die geometrische Struktur der Klüfte und Poren von Stampfbeton möglichst exakt zu beschreiben. Die Möglichkeit der Hohlraumerkundung von porösem Stampfbeton mittels Neutronen-Tomographie wurde am Forschungsreaktor I der TU München in Garching an drei Betonbohrkernen mit einem maximalen Durchmesser von 6 cm und einer Probenhöhe von rd. 10 cm überprüft. Von besonderem Interesse war die visuelle Darstellung der vorhandenen Hohlraumstruktur innerhalb des Probekörpers und der Verlauf und die Größe durchgehender Kapillarporen, da diese für die Durchlässigkeit und somit auch für die Eindringfähigkeit der verwendeten Bindemittelsuspension verantwortlich sind. Im vorliegenden Bericht werden Möglichkeiten und Grenzen der Neutronen-Computer-Tomographie für den gewünschten Einsatzzweck beschrieben.

1 Grundprinzipien der Computer-Tomographie

Die Computer-Tomographie ist ein bildgebendes Untersuchungsverfahren, mit dem unter der Verwendung von Sondenstrahlen (z.B. Gamma-, Röntgenstrahlen oder Neutronen) zweidimensionale Schnitte erzeugt werden können. Das mathematische Modell der Tomographie ist u.a. bei WEGNER 1998 ausführlich erläutert. Die einzelnen Schritte Projektion, Inversion der Radon-Transformierten und Rückprojektion werden dort im Detail eingehender erläutert.

Durch Drehung des zu untersuchenden Objekts lässt sich mittels Überlagerung aller Projektionen ein berechnetes Bild eines zweidimensionalen Schnitts durch den Prüfkörper gewinnen. Summiert man diese Schnitte über die Höhe auf, kann eine dreidimensionale Darstellung des untersuchten Prüfkörpers erzeugt werden.

Die in Garching existierende Messstation setzt sich, wie Abb. 1 zeigt, aus folgenden Elementen zusammen:

- Szintillator: Ein chemisches Gemisch bestehend aus ${}^6\text{LiF}$ und ZnS(Ag) -Kristallpulver, welches mit einem Bindemittel zu einer 0,3 mm dicken, milchigen Schicht verpresst ist, wird auf eine 1 mm starke Aluminiumplatte aufgetragen. Die Ortsauflösung des Szintillators beläuft sich nach Aussagen der Hersteller auf mindestens 100 μm .
- Umlenkspiegel: Dieser aluminiumbedampfte Oberflächenspiegel lenkt Photonen zum Objektiv in Richtung der CCD-Kamera um, wobei er die Neutronen zum Strahlfänger hin passieren lässt. Pro eintreffendes Neutron werden rd. $1,77 \cdot 10^5$ Photonen emittiert.
- Strahlfänger: Er absorbiert die emittierten Neutronen nach dem Durchdringen des Untersuchungsobjekts.
- Objektiv: Mit einer Brennweite von 24 mm und einer Lichtstärke von 1 : 1,4 garantiert das Objektiv die Bündelung des Lichts und die exakte Abbildung auf den 10 mm \times 10 mm großen CCD-Chip.
- Gekühlte CCD-Kamera: Sie besteht aus einem CCD-Chip, der Kameraelektronik und der Kühlung dieser Kamera. Der CCD-Chip liest die ankommenden Lichtsignale mittels einer HighDetectivity-Auslese ein. Über einen 16-Bit A/D-Wandler werden die optischen Daten digitalisiert. Mit einer zweistufigen Peltier-Kaskade wird das CCD auf -50°C gekühlt.
- Rechereinheit: Über eine AT-Bus-Steckkarte ist der Rechner mit dem CCD verbunden. Simultan zur Datenspeicherung wird der gesamte Versuchsablauf von einer Steuerkarte und dem Rechner gleichzeitig gesteuert.

Für die mathematische Auswertung der Neutronen-Computer-Tomographie müssen einige Annahmen bezüglich der Strahlungseigenschaften getroffen werden:

- Es handelt sich um einen monochromatischen Neutronenstrahl.
- Der Neutronenstrahl ist ein idealer Parallelstrahl.
- Gestreute Neutronen treffen nicht den Detektor.
- Außerhalb der Probe findet keine Wechselwirkung statt.

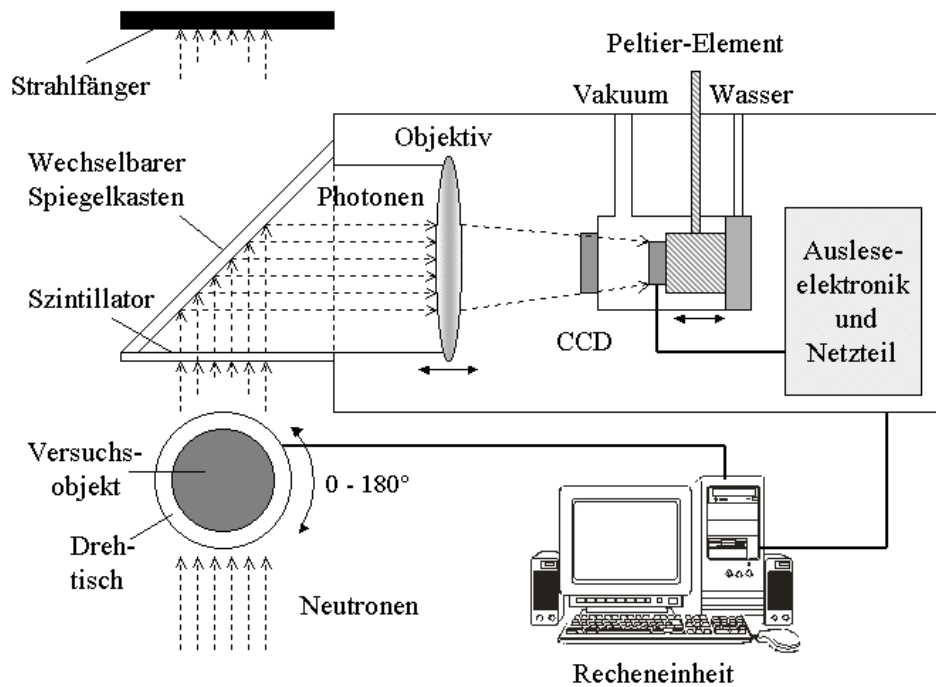


Abb. 1: Messaufbau der Neutronen-Computer-Tomographie des Physik Departments E21 der Technischen Universität München (nach SCHILLINGER 1999).

2 Neutronen-Computer-Tomographie

Ein entscheidender Vorteil der Neutronen-Computer-Tomographie gegenüber herkömmlichen Durchstrahlungsmethoden, wie z. B. dem Röntgenverfahren, liegt darin, dass Neutronen von schweren Elementen, wie z.B. Eisen, Wismut oder Blei, weniger absorbiert werden, so dass dickere Objekte untersucht werden können. Die Detektion leichter Elemente (z. B. Wasserstoff) ist ebenfalls effizienter, weil Neutronen von Wasserstoff besonders stark gestreut werden. Ein Nachteil liegt in der sogenannten Strahlaufhärtung, welche bei polychromatischen Neutronenstrahlung, d.h. bei dem Vorhandensein von Neutronen verschiedener Energie, auftritt. Die Strahlaufhärtung bezeichnet den Effekt, dass der Schwächungskoeffizient des untersuchten Materials für kleinere Energien größer ist als bei größeren Energien. Folge ist, dass das Ausgangsspektrum einen geringeren Anteil von Neutronen mit kleinerer Energie hat als das Eingangsspektrum. Bei der Verwendung von monochromatischen Neutronen wird dieser Effekt der Strahlaufhärtung wegen des relativ schmalen Energiespektrums von Neutronen vernachlässigt.

Die Größe der zu untersuchenden Objekte ist begrenzt, da Neutronen zu dicke Körper nicht mehr durchdringen können. Im neuen Forschungsreaktor München II, der voraussichtlich am Ende des Jahres 2001 den Betrieb aufnehmen wird, besteht die Möglichkeit, Proben verschiedener Materialien mit einem Durchmesser von bis zu

25 cm zu durchstrahlen. Die Materialeigenschaften des Untersuchungsgegenstands spielen hierbei ebenso eine wichtige Rolle.

In SCHILLINGER und PFISTER 1998 befinden sich Beispiele, an denen diese Untersuchungsmethode erfolgreich durchgeführt wurde. Zu den bisher durchgeführten Computer-Tomographien zählen:

- Untersuchung schwerer, metallischer Proben
- Wanddickenmessung von Turbinenschaufeln (siehe Abb. 2 und 3)
- Lokalisierung von Bauteilfehlern (Risse, Lunker, Inhomogenitäten)
- Nachweis von Korrosionsschäden
- Untersuchung archäologischer Proben



Abb. 2: Photographie einer Turbinenschaufel.



Abb. 3: Tomographisches Ergebnis einer Turbinenschaufel.

3 Untersuchungen an Bohrkernen aus porösem Massenbeton mittels Neutronen-Computer-Tomographie

Zum Zwecke der Beurteilung des Istzustandes werden im Zuge der Planung von Sanierungsmaßnahmen an Wasserbauwerken wie z. B. Wehranlagen, Kraftwerksbauten, Schleusen oder Staumauern immer Bohrkern aus dem Bestandsbeton entnommen. Neben einer Inaugenscheinnahme werden an diesen Bohrkernen üblicherweise die Trockenrohdichte, die Wasseraufnahme und die Druckfestigkeit (zerstörend) geprüft. Das in Abschnitt 2 dieses Berichts genannte anschauliche Untersuchungsbeispiel einer Turbinenschaufel diente als Anregung, die innere Gefügestruktur eines Bohrkerns aus Beton mittels Neutronen-Computer-Tomographie zu erkunden und visuell darzustellen.

Neben ihrer geometrischen Lage und Form von Poren spielt vor allem ihre Größe eine entscheidende Rolle. In Abb. 4 sind Porengrößeneinteilung im Beton nach SETZER 1975 mit zugehörigem Verfahren zur Bestimmung der Porengrößen dargestellt. Demnach können die durch eine Feinstbindemittelinjektion erfahrungsgemäß zugänglichen Porengrößen zwischen 50 μm und 1 cm nicht mit einem einheitlichen Verfahren untersucht werden. Zusätzlich sind Porengrößenuntersuchungen in größerem Umfang mit einem vertretbaren wirtschaftlichen Aufwand nicht durchführbar.

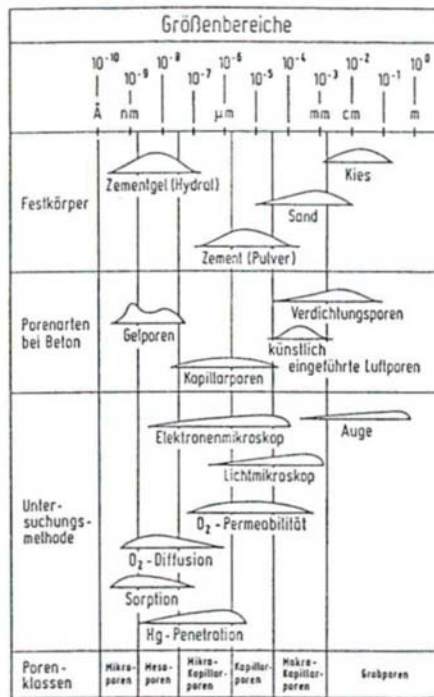


Abb. 4: Größenbereich der Betonbestandteile und Porenarten sowie zugehörige Untersuchungsmethoden aus SETZER 1975.

Ziel der tomographischen Untersuchung war es zunächst, eine visuelle Darstellung des Porenraumes von porösem Massenbeton zu erhalten. Auf Basis der visuellen Daten sollte eine Porengrößenverteilung des untersuchten Prüfkörpers ermittelt werden.

Dazu wurden die in Tab. 1 genauer bezeichneten Bohrkern aus einem Pfeiler der Wehranlage Jettenbach/Inn und der Stauwand des Kraftwerks Finsing/Mittlerer Isarkanal mit dem in Abb. 1 dargestellten Versuchsaufbau untersucht.

Bezeichnung	Höhe [cm]	Durchmesser [cm]	Volumen [dm ³]	Trockenrohichte [kg/dm ³]	Wasseraufnahme [%]	Entnahmebauwerk
Probe 1	10,80	6,10	0,316	2,35	7,4	Jettenbach
Probe 2	10,04	6,15	0,298	2,20	13,7	Finsing
Probe 3	10,03	6,16	0,299	2,30	9,1	Finsing

Tab. 1: Abmessungen und Kennwerte der untersuchten Bohrkern.

Mit Hilfe einer 3D-Visualisierungssoftware der Firma *Volume Graphics GmbH* wurde aus den schichtweise ermittelten Datensätzen (Abb. 6 und Abb. 7) ein dreidimensionales Modell des untersuchten Bohrkerns (Abb. 5) entwickelt. Im ebenen Schnitt sind die luftgefüllten Hohlräume rot dargestellt. Abb. 8 zeigt die Probe 1 mit gefiltertem Luftraum. Die luftgefüllten Poren im Inneren des Bohrkerns sind wieder mit roter Farbe abgebildet. Die deutlich vermehrte Rotintensität an den beiden Enden des Körpers resultiert daraus, dass hier die anstehende Luftsäule erfasst wurde. Oben stand eine reine Luftsäule an, dagegen war am Fuß des Körpers ein Luft-Klebstoff-Gemisch vorhanden, welches die Probe auf dem Drehtisch fixierte. In Abb. 9 ist Probe 1 anhand einer Ansicht näher erläutert.

In bisher erfolgten eigenen Untersuchungen (WILDNER 2000) wurde immer nach einer Inaugenscheinnahme eines Bohrkerns entschieden, ob dieser Durchströmversuchen unterzogen werden sollte. Die in Abb. 8 rot dargestellten Bereiche der Mantelfläche des Betonzylinders, die sich nicht bis in das Innere erstrecken, verdeutlichen, dass eine visuelle Beurteilung der Mantelfläche eines Bohrkerns noch kein ausreichendes Kriterium zur Feststellung eines durchgängigen Porensystems darstellt, das Rückschlüsse auf eine mögliche Injizierbarkeit eines Bohrkerns zulässt.

Sieht man vom erfassten Luft-Klebstoff-Gemisch und der anstehenden Luftsäule einmal ab, ist es möglich, einzelne Porenbereiche zu unterscheiden. Auffällig ist die bläschenartige Wolke in der Mitte des unteren Drittels. Es wurde als Poren-Feststoff-Gemisch klassifiziert. Da die Auflösung des Verfahrens aufgrund der gewählten Projektionsgeometrie auf etwa $400\ \mu\text{m}$ begrenzt ist, ist auf die Tatsache zu schließen, dass hier viele variable und vor allem sehr kleine Luftporen in der Zementmatrix vorhanden sind, deren Größe nicht exakt bestimmt werden kann, aber die dennoch qualitativ nachgewiesen werden können. Solche Poren-Feststoff-Gemische sind im ebenen Schnitt (Abb. 6 und Abb. 7) auch neben den eindeutig roten Stellen als dunklere Mischbereiche zu erkennen. Diese Bereiche sind die Übergangszonen von Feststoff zu luftgefüllten Poren und entstehen wegen der oben bereits beschriebenen begrenzten Auflösung der Neutronen-Tomographie von etwa $400\ \mu\text{m}$. Davon ausgehend, dass bei einem Größtkorndurchmesser von ca. $20\ \mu\text{m}$ des Feinstbindemittel-trockenstoffes in einer Injektionssuspension Poren und Klüfte im Beton bis zu einem Durchmesser von $50\ \mu\text{m}$ mit hydraulischen Bindemitteln erfahrungsgemäß gerade noch injiziert werden können, wäre es durchaus wünschenswert, dieses Poren-Feststoff-Gemisch geometrisch exakter zu beschreiben. Grundvoraussetzung für die Eindringfähigkeit eines Fluids ist ein kommunizierendes Netz von Porenkanälen. Anhand dieser Visualisierung kann aufgrund der begrenzten Auflösung nicht

festgestellt werden, ob einzelne Poren dieses Poren-Feststoff-Gemischs miteinander in Verbindung stehen.

Die untersuchten Proben 1 bis 3 wurden jeweils in ca. 300 Schnittebenen durchstrahlt. Der Großteil der durchstrahlten Schnitte enthielt nur einen geringen Porenflächenanteil im Verhältnis zur Gesamtfläche (Abb. 6). In einigen wenigen Schnitten konnte ein Porenflächenanteil von 10 % und mehr ermittelt werden (Abb. 7).



Abb 5: Untersuchter Bohrkern (Probe 1).

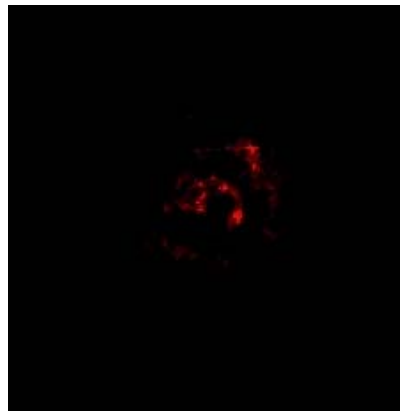


Abb. 6: Schnittbild mit geringem Anteil an Porenfläche.

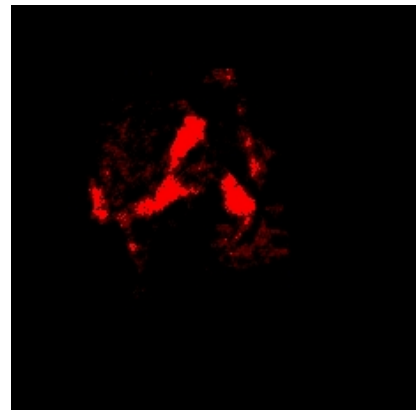


Abb. 7: Schnittbild mit Hohem Anteil an Porenfläche.



Abb. 8: 3D-Darstellung von Probe 1 mittels Neutronen-Computer-Tomographie.

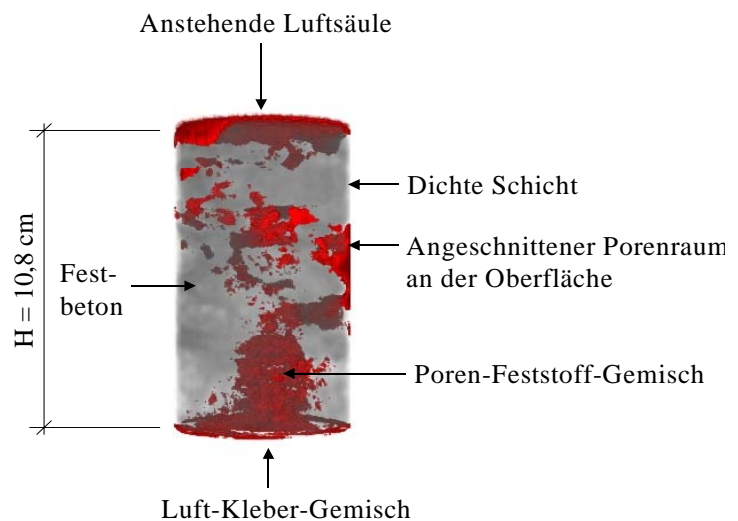


Abb. 9: Ansicht einer Neutronen-Computer-Tomographie der Probe 1 mit Erläuterungen.

4 Porenflächenverteilungen als Ergebnisse der Neutronen-Computer-Tomographie

Wie bereits geschildert, konnte die Idee, aus den Ergebnissen der Computer-Tomographie eine Porengrößenverteilung eines Bohrkerns aus porösem Massenbeton zu ermitteln, aufgrund der begrenzten Auflösung des Verfahrens nicht weiter verfolgt werden.

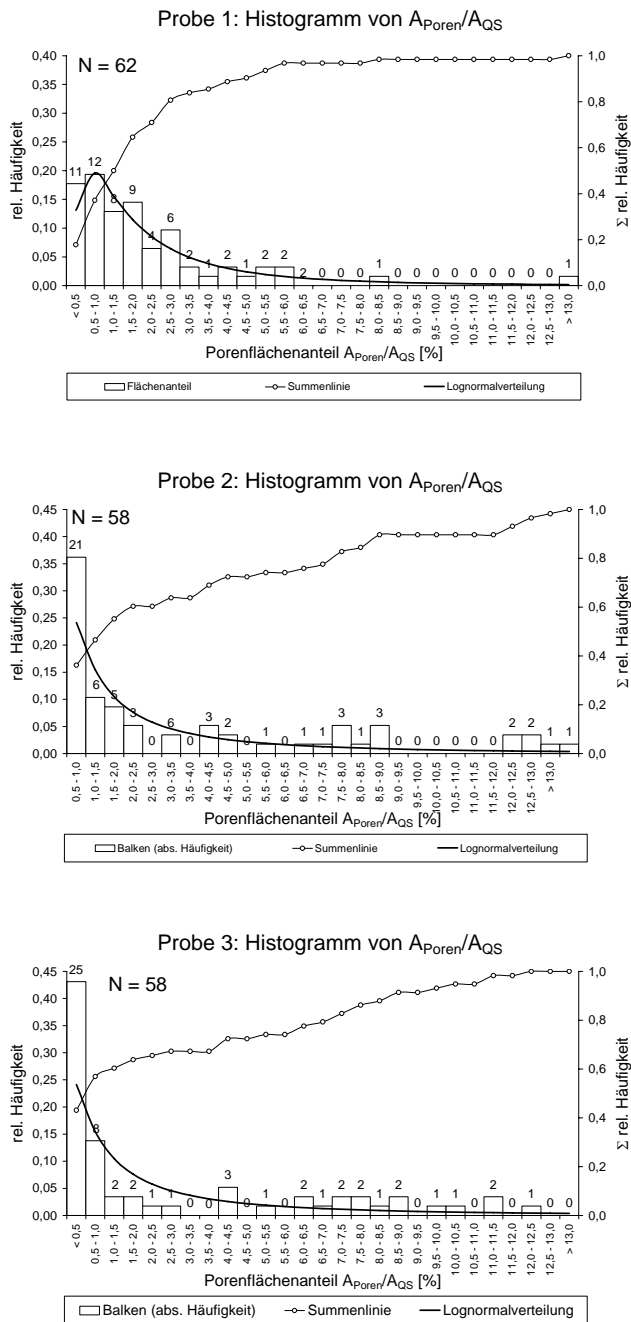


Abb. 10: Verteilung der Flächenanteile der untersuchten Schnitte der drei Betonbohrkerne.

Jedoch konnte mit der großen Anzahl der erzeugten Schnittbilder der Tomographie eine Porenflächenverteilung ermittelt werden. Für die Auswertung wurde jeder fünfte der 300 erzeugten Schnitte erfasst. Abb. 10 zeigt die Histogramme der ermittelten Porenflächenverteilungen aller drei untersuchten Probekörper. Der Anteil der ermittelten Schnitte mit kleinen Porenflächen überwiegt stark. Große Porenflächenanteile wurden nur in wenigen Schnitten erkundet. Dies bedeutet, dass bereits - im Vergleich zu heute üblichem konventionellem Konstruktionsbeton - in einem punktuellen Ausschnitt eines Massenbetonbauwerks aus Stampfbeton starke Inhomogenitäten auftreten können. Solche „punktuellen Inhomogenitäten“ können durch die in der Biontechnologie üblichen Standardverfahren wie z. B. Ermittlung der Rohdichte, des volumenbezogenen Wasseraufnahmegrades oder der Druckfestigkeit nicht erfasst werden.

5 Wertung und Ausblick

Mit dem Verfahren der Neutronen-Computer-Tomographie am Forschungsreaktor I der TU München in Garching war es möglich, mit einer auf ca. 400 μm begrenzten Auflösung den Porenraum eines Bohrkerns aus Beton mit einem Durchmesser von rd. 6 cm und rd. 10 cm Höhe darzustellen.

Eine Porengrößenverteilung konnte an den untersuchten Bohrkernen nicht ermittelt werden. Jedoch konnte anhand der Auswertung der Schnittbilder eine Verteilung des Porenflächenanteils an der Gesamtschnittfläche aufgestellt werden.

Ausgehend von einem in der Wirklichkeit recht massigen Bauwerksvolumen mit beispielhaften Abmessungen eines Wehrpfeilers von 15 m \times 4 m \times 20 m (L \times B \times H) im Verhältnis zum untersuchten Probekörpervolumen mit $h/d = 10 \text{ cm} / 6 \text{ cm}$ bzw. einer aus wirtschaftlichen Gründen sehr geringen möglichen Probekörperanzahl (Stichprobenanzahl) hat eine Untersuchung der Bohrkerns mittels Neutronen-Tomographie stark wissenschaftlichen Charakter; prinzipiell ist eine Untersuchung von Beton mittels Röntgen-Computer-Tomographie auch möglich. Andererseits dürfte neben der Röntgen-Computer-Tomographie derzeit kein Verfahren existieren, Inhomogenitäten innerhalb eines porösen Bohrkerns aus Stampfbeton exakter zu erfassen.

Wegen der Einstellung des Betriebs von Forschungsreaktor München I im Herbst 2000 war der Untersuchungsumfang auf drei Proben begrenzt. Mit der geplanten Inbetriebnahme des neuen Forschungsreaktors München II Ende 2001 ergeben sich in Zukunft deutlich kürzere Untersuchungszeiten. Zusätzlich wird die Untersuchung größerer Prüfkörper möglich.

Literatur

Schillinger, B. 1999: „Tomographie mit thermischen Neutronen und zu deren routinemäßigem Einsatz“, Doktorarbeit Technische Universität München, Mensch und Buch Verlag, Berlin.

Schillinger, B.; Pfister, G. 1998: „Radiographie und Tomographie an technischen Objekten“, Neue Forschung-Neutronenquelle Garching, Technische Universität München, Projektgruppe FRM-II, Öffentlichkeitsarbeit, Fränkischer Tag, Bamberg.

Setzer, M. J. 1975: „Mikrogefüge des Zementsteins und dessen Einfluss auf das mechanische Verhalten des Betons“, Zement und Beton, Fachzeitschrift, S. 29 – 33.

Wegner, M. 1998: „Spezielle Anwendungen der Radiographie und der Computer-Tomographie mit Neutronen“, Diplomarbeit, Technische Universität München, Institut für Experimentalphysik E21, unveröffentlicht.

Wildner, H. 2000: „Sanierung von Wasserbauten aus porösem Massenbeton mittels Injektionen mit hydraulischen Bindemittelsuspensionen“, Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen. Symposium, Technische Universität Graz, S. 317 – 326, Oktober 2000.

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. Harald Wildner
Lehrstuhl für Wasserbau
und Wasserwirtschaft
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80333 München
E-mail: h.wildner@bv.tum.de

Dipl.-Ing. Ronald Haselsteiner
Lehrstuhl für Wasserbau
und Wasserwirtschaft
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80333 München
E-mail: r.haselsteiner@bv.tum.de

Dr. rer. nat. Burkhard Schillinger
Projektgruppe FRM-II, Neue Forschungs- und Neutronenquelle Garching
Technische Universität München
85747 Garching
E-mail: schilli@physik.tu-muenchen.de