

Zerstörungsfreie Strukturanalyse von Baustoffen mittels Computertomografie und intelligenter Bildverarbeitung

1 Einleitung

Mittels Computertomografie (CT) lassen sich Objekte schichtweise aufnehmen und anschließend digital zu dreidimensionalen Modellen vereinigen. Derartige Verfahren werden gelegentlich in der Bodenkunde zur Darstellung von Wurzelgefügen, Wurmgängeln o. ä. [2, 3] angewendet. Weiterhin findet die CT Anwendung in der Paläontologie [4], in der zerstörungsfreien Prüfung verschiedener Werkstoffe [5] sowie in der Betontechnologie [6]. Porenuntersuchungen mit anschließender statistischer Analyse wurden z. B. an metallischen zellulären Werkstücken erstellt [7]. Im Bereich der Werkstoffkunde kann die CT sowohl zur Darstellung von Porenräumen oder Rissgefügen als auch untergeordnet zur Abbildung von Materialien mit unterschiedlichen Dichten herangezogen werden. Neben der Visualisierung der Daten und somit der Möglichkeit einer qualitativen Untersuchung bietet diese Methode den Vorteil einer möglichen statistischen Auswertung mittels Methoden der Bildverarbeitung. Dabei sind Aussagen nicht nur hinsichtlich der Gesamtporosität, sondern auch z. B. bezüglich der Porenradialverteilung, der Längung von Poren oder der bevorzugten Ausrichtung der Poren im Untersuchungsobjekt möglich.

2 Methodik

Die Vorgehensweise wird zum einen an einer Ziegelplatte (15 x 20 x 20 cm) demonstriert (Bild 1a), die aus einer stark porosierten Mauerziegelmasse zur Prüfung der Wärmeleitfähigkeit erstellt wurde. Weiterhin erfolgte die Untersuchung eines geschäumten Betons mit Leichtzuschlag (Bild 1b), bei dem unterschiedliche Porenräume dargestellt werden sollen. In einem dritten Beispiel wurde ein stahlfaserbewehrter hochfester Beton [8] herangezogen (Bild 1c), der zur Prüfung seiner Beschussfestigkeit einer hochdynamischen Belastung ausgesetzt wurde. An diesem Probekörper wurde das durch den Beschuss entstandene Rissgefüge dreidimensional dargestellt.

2.1 Computertomografie (CT)

Bei der CT wird eine Röntgenröhre horizontal oder vertikal um einen Körper bewegt. Diese Röhre erzeugt mit einer Hochspannung von 120 bis 150 kV bei klinischen Geräten einen fächerförmigen Röntgenstrahl, der das Untersuchungsobjekt in einer vordefinierten Ebene durchstrahlt. In Abhängigkeit von der Dichte, der Dicke sowie der Ordnungszahl der durchstrahlten Materie wird der Strahl mehr oder weniger stark geschwächt. Gegenüber der Röhre befindet sich halbkreisförmig angeordnet eine Anzahl von 700 bis 1 000 Detek-

Dr. rer. nat. Andreas Murr, ENSA W. Schroll + Partner GmbH, D-81677 München

Dr. rer. nat. Thomas Hatzl, Sachverständiger für Geochemie und Mineralogie anorganischer Rohstoffe, D-86932 Pürgen
Dipl.-Min. Christoph Böhm, H. G. Geodata GmbH, Robert Schenkel, D-07743 Jena

Dr. rer. nat. Peer-L. Gehlken, Prüfung mineralischer Roh- und Reststoffe, D-37136 Ebergötzen

Dr. med. Herbert Klengel, Facharzt für Radiologische Diagnostik, Radiologische Gemeinschaftspraxis Göttingen, D-37075 Göttingen

Nondestructive structural analysis of building materials by means of computed tomography and intelligent image processing

1 Introduction

By means of computed tomography (CT), objects can be imaged layer by layer and digitally put together to construct three-dimensional models. Such methods are occasionally employed for depicting root morphologies, earthworm burrow structures, etc. in the field of pedology [2, 3]. CT is also useful in paleontology [4], in the nondestructive testing of various raw materials [5] and in concrete technology [6]. For example, pore probes with subsequent statistical analysis have been conducted on metallic cellular workpieces [7]. In materials technology, CT can serve in the imaging of voids and crack structures as well as, in a subordinate function, for imaging materials with different densities. Apart from enabling the visualization of data and, hence, attendant qualitative investigation, this method also offers the advantage of facilitating statistical evaluation via image processing techniques. The results provide information not only in terms of true porosity, but also with regard to pore-size distribution, pore elongation and/or the preferred orientation of pores in the object of investigation.

2 Methodology

The procedure is demonstrated on a clay tile (15 x 20 x 20 cm; Fig. 1a) made of porous ceramic brick body as a test specimen for determining thermal conductivity. A foamed concrete with lightweight aggregate (Fig. 1b), various voids of which were to be imaged, was also studied. As a third example, a steel-fiber-reinforced high-strength concrete [8] (Fig. 1c) was exposed to a high-dynamic load for the purpose of ascertaining its resistance to penetration. The crack structure resulting from bombardment of the specimen was imaged in three dimensions.

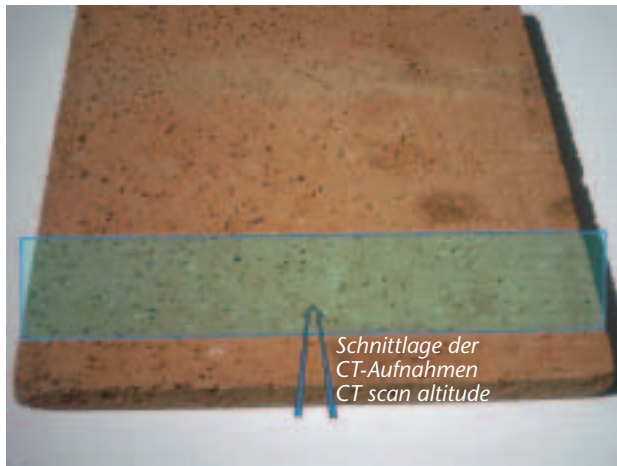


Bild 1a: Ziegelplatte mit Schnittlage der CT-Aufnahme. Objektbreite 20 cm

Fig. 1a: Clay tile with CT scan altitude. Object width: 20 cm

toren, die in Abhängigkeit von der auftreffenden Röntgenstrahlenintensität elektrische Signale erzeugen. Aus verschiedenen Durchleuchtungswinkeln einer jeden Schnittebene kann über mathematische Transformationen berechnet werden, welche Dichte an jeder durchstrahlten Position im Probekörper vorhanden ist. Es entsteht somit ein in seiner Dicke einstellbares Querschnittsbild des Untersuchungsobjektes. Vorliegende Untersuchungen wurden an einem Gerät für klinische Zwecke (SIEMENS Somatom Balance [Bild 2]) durchgeführt. Zur Durchdringung der Probekörper mit vergleichsweise hoher Dichte wurde eine Anregungsspannung von 130 kV gewählt. Als Abstand der einzelnen Schichten wurden 0,5 mm ausgewählt, da dieser Ebenenabstand für die zu erfassenden Porenbereiche bzw. Risse ausreichend erschien. Es wurden über 30 Messebenen aufgenommen, sodass die Untersuchungsstrecke in den Probekörpern mindestens 15 mm betrug.

Als Datensatz erhält man eine Abfolge von übereinander liegenden Bildern (DICOM-Format), in denen jede Schichtebene als Graustufenabbildung abgebildet wird (Bild 3). Dabei gilt, dass Körper mit geringer Dichte dunkler, Körper mit hoher Dichte heller erscheinen. In der untersuchten Ziegelprobe können somit Poren von Matrix unterschieden sowie einzelne Körner mit hoher Dichte (evtl. Fe-Oxide) innerhalb der Matrix erkannt werden (Bild 3). Im Leichtbeton ist eine Differenzierung von Poren (schwarz) und Matrix (hellgrau) möglich (Bild 4). Im hochdynamisch beanspruchten Beton sind die durch den Beschuss induzierten Risse klar zu erkennen (Bild 5). Weiterhin lassen sich bei dieser Probe nahezu weiße lineare Körper erkennen, bei denen es sich um Bewehrungsstifte aus Stahl handelt. Auf Grund der vergleichsweise hohen Dichte bzw. Dichteunterschiede im Material insbesondere beim massiven Beton ergeben sich Teilvolumenartefakte (Interferenzmuster/Streifenmuster) in den Aufnahmen, die bei den anschließenden Auswertungen berücksichtigt werden müssen.

2.2 Digitale Bildverarbeitung

Zur Erstellung von 3-D-Auswertungen werden im ersten Schritt die einzelnen Bildebenen maskiert, d. h., es werden gleiche Bildbereiche für die weitere Bearbeitung festgelegt. Dadurch werden z. B. Zonen außerhalb der Probe ausgeklam-

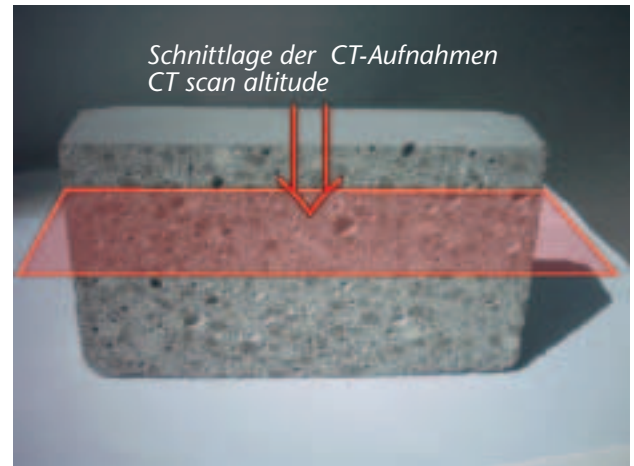


Bild 1b: Leichtbeton, der aus einer geschäumten Matrix (hellgrau) sowie Leichtzuschlägen (dunkelgrau) besteht. Innerhalb der Matrix sind große Luftporen im mm-Bereich zu erkennen. Objektbreite ca. 15 cm

Fig. 1b: Lightweight concrete comprising foamed matrix (light gray) and lightweight aggregates (dark gray). Large millimeter-range air voids are discernible within the matrix. Object width: approx. 15 cm

2.1 Computed tomography (CT)

In CT imaging, a thin X-ray beam is moved axially or radially around a body. In clinical apparatus, a high voltage of 120–150 kV enables the X-ray tube to generate a fan-shaped beam that penetrates the object of interest on a predefined plane. Depending on the density, thickness and nuclear charge number of the irradiated material, the beam experiences more or less pronounced attenuation. Opposite the X-ray tube there is a hemispherical array of somewhere between 700 and 1,000 detectors that generate electrical signals as functions of the impinging X-ray intensity. The density prevailing at each irradiated position within the body of interest can be calculated.

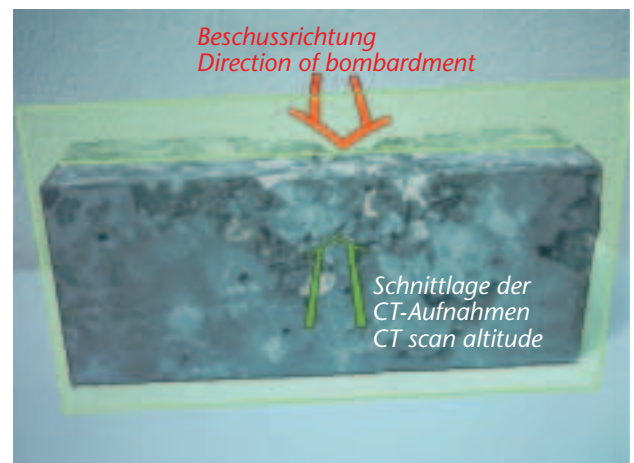


Bild 1c: Hochdynamisch belasteter hochfester Beton mit Angabe der Beschussrichtung sowie der Schnittlage der CT-Aufnahmen. Durch den Beschuss erfolgte ein Materialausbruch an der dem Projektil zugewandten Seite sowie Rissbildung auf der abgewandten Seite. Objektbreite ca. 20 cm

Fig. 1c: High-dynamic-loaded, high-strength concrete, with direction of bombardment and scanning attitudes indicated. Bombardment causes material to pop out on the project dial-impact side and cracks to form on the opposite side. Object width: approx. 20 cm

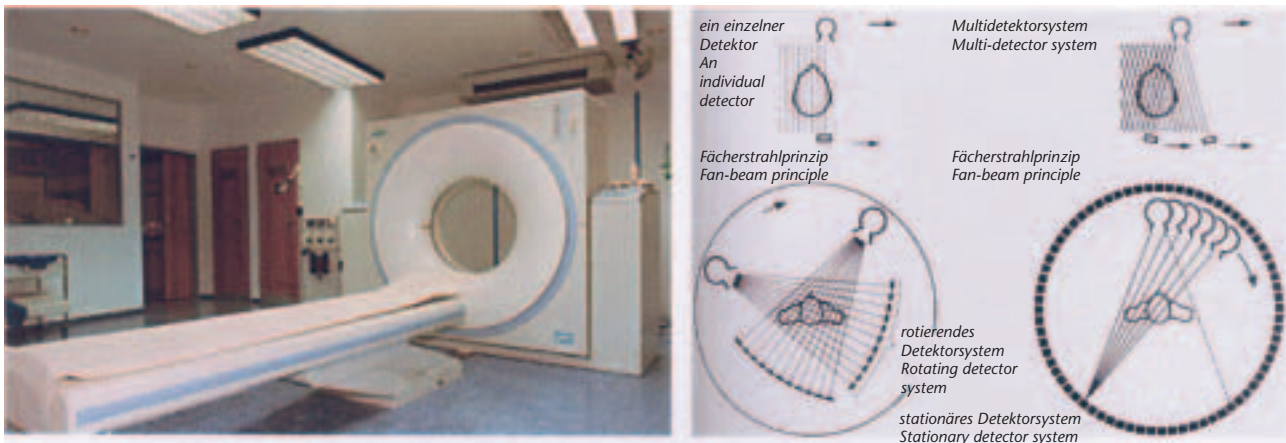


Bild 2: CT-Gerät SIEMENS Somatom Balance (links) sowie schematische Funktionsweise (rechts). Erläuterungen siehe Text
 Fig. 2: SIEMENS Somatom Balance CT apparatus (at left) and its pertinent functional schematic (explained in further text)

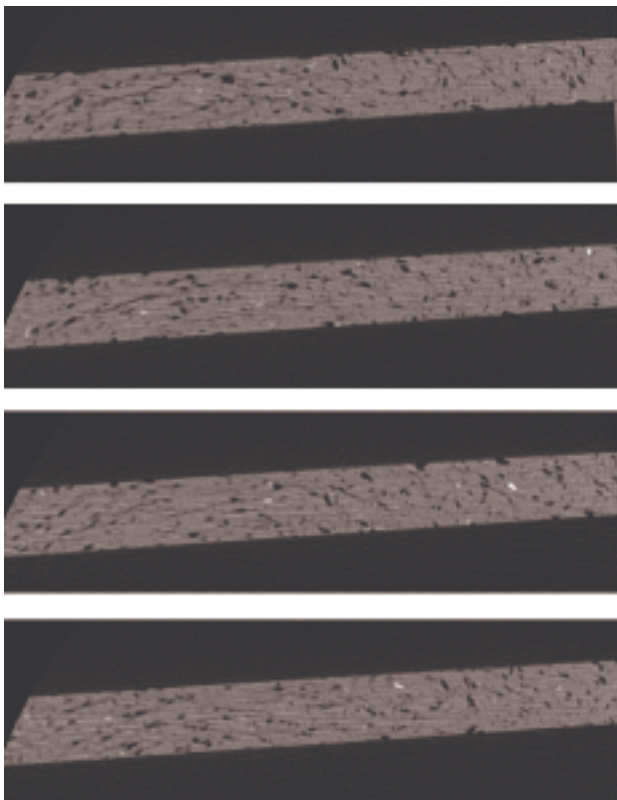


Bild 3: Darstellung der Rohdaten der CT-Messung (Probe Ziegelplatte) in den Abständen 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm (von oben nach unten bezogen auf die 1. Messebene). Die Ziegelmatrix erscheint grau, die Poren erscheinen schwarz. Bei den weißen Flecken im Bild handelt es sich um Körper mit hoher Dichte (evtl. Fe-Oxide). Im Bild ist eine Streifung innerhalb der Ziegelmatrix erkennbar (Teilvolumenartefakte, die auf das Vorhandensein von Material mit stark unterschiedlichen Röntgenschwächungskoeffizienten zurückgeführt werden können). Diese Artefakte müssen bei der Porenraumanalyse berücksichtigt werden
 Fig. 3: Images of raw data from the CT scanning of a clay-tile specimen at intervals of 0 mm, 5 mm, 10 mm and 15 mm (from top, in relation to the 1st scanning plane). The heavy clay matrix appears gray; the pores appear black. The white spots in the images are particles of high density (perhaps Fe oxides). The heavy clay matrix displays distinct striping (partial-volume artifacts attributable to the presence of material with very dissimilar X-ray attenuation coefficients). These artifacts must be taken into account for the pore-volume analysis

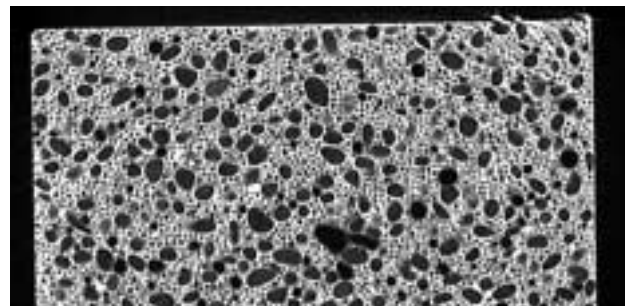


Bild 4: CT-Aufnahme des Leichtbetons. Im Bild sind kleine Poren erkennbar, bei denen es sich um die interne Porosität der Leichtzuschläge (Blähton) sowie die Schaumporen der Matrix handelt. Weiterhin befinden sich große Luftporen im Material
 Fig. 4: CT image of lightweight concrete. The small pores seen in this image are the manifest internal porosity of the lightweight aggregates (expanded clay) and of the foamed matrix. The material also contains numerous large air voids

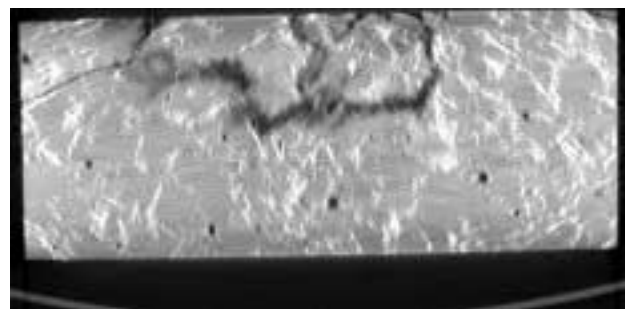


Bild 5: CT-Aufnahme des hochfesten Betons. Auf Grund der dynamischen Belastung (Beschuss) ergeben sich Risse im Beton, die im oberen Bildbereich erkennbar sind. Weiterhin lassen sich Poren in der Betonmatrix erkennen. Matrix und Zuschläge erscheinen hell. Eine Differenzierung ist auf Grund der hohen Dichte sowohl der Matrix als auch der verwendeten Quarzitzuschläge bei den eingestellten Messparametern nicht möglich. Bei den hellen Streifen innerhalb der Matrix handelt es sich um Bewehrungsfasern aus Stahl
 Fig. 5: CT image of high-strength concrete. The dynamic load (bombardment) induced cracking of the concrete, as can be seen in the upper part of the image. The concrete matrix also is seen to contain individual pores. Both the matrix and the aggregates are of light color. Due to the high density of both the matrix and the employed quartzite aggregates, no differentiation is possible for the given test-parameter settings. The near-weight striations in the matrix are steel-reinforcing fibers

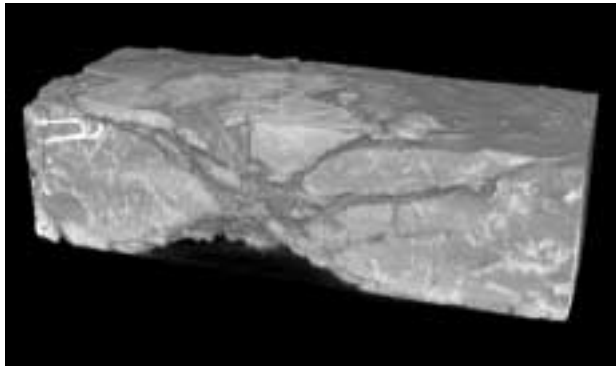


Bild 6: Dreidimensionale Darstellung des dynamisch belasteten Betons als Rekonstruktion der CT-Daten. Der Eintritt des Projektils erfolgte an der Probenunterseite und führte zu intensiver Rissbildung durch den gesamten Probenquerschnitt
 Fig. 6: Three-dimensional image of dynamically loaded concrete as a reconstruction of CT data. The projectile impinged upon the bottom of the specimen and caused intensive cracking over the entire cross section of the specimen

merkt. Die erhaltenen Ausschnitte können anschließend zu einem 3-D-Bild zusammengefügt werden, wie in Bild 6 und 7 an den Beispielen des Porenbetons sowie des dynamisch belasteten Betons dargestellt ist.

Bei der Analyse von Porenräumen bzw. Rissen ist lediglich der Unterschied zwischen Grauwerten der Poren/Risse und Grauwerten der Matrix von Interesse. Während auf den ersten Blick die Pore als „schwarz“ und die Matrix als „grau“ erscheint, ist bei detaillierter Betrachtung zu erkennen, dass ein kontinuierlicher Grauwertübergang zwischen Pore und Matrix besteht (Bild 8). Bei der Umwandlung der Bilder in ein Binärbild ist es daher erforderlich, einen Schwellwert (Threshold) festzulegen. Grauwerte unterhalb dieses Schwellwertes werden dem Porenraum, Grauwerte über dem Schwellwert der Matrix zugerechnet.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Schwellwerte sind in Bild 9 am Beispiel des Ziegels dargestellt. Bei vorliegender Untersuchung wurde der Schwellwert über einen visuellen Vergleich zwischen den Binärdaten und der digitalen CT-Abbildung einer Schnittebene auf einen Grauwert von 73 festgelegt. Bei geringerem Schwellwert werden die Poren unterrepräsentiert, ist der Schwellwert höher, erscheinen die in Abb. 3 beschriebenen Artefakte zunehmend als Porenräume.

Nach dem Maskieren und Binarisieren werden die Bildebenen passgenau und im – bei der CT-Messung eingestellten – Schichtebenenabstand übereinander gelegt (Bild 10).

In dem erhaltenen Bilderstapel werden übereinander liegende Poren- bzw. Matrixbereiche über die Lücken zwischen den Stapeln hinweg verbunden. Aus den übereinander liegenden 2-D-Abbildungen der Poren werden über eine Umrechnung von zweidimensionalen Pixeln in dreidimensionale Voxel somit 3-D-Porenmodelle generiert, deren Ausdehnung bzw. Volumen über eine Kalibrierung (z. B. über die Gesamtbreite des Untersuchungsobjektes) errechnet werden kann. Jedem Voxel wird der Grauwert 0 (= Pore) oder 255 (= Matrix) zugeordnet, sodass ein Datensatz zur Verfügung steht, der Informationen über Porenräume in allen Raumrichtungen enthält. Die laterale Pixelauflösung ist in erster Linie gerätebedingt und hängt zum einen von der Materialdichte sowie den Aufnahmeparametern ab. Zum anderen kann die Pixelauflösung durch Methoden der Bildverarbeitung modifiziert werden.

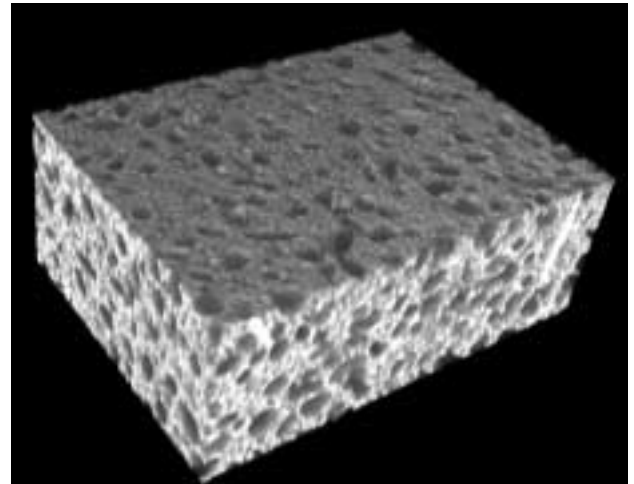


Bild 7: Darstellung des Leichtbetons (Rekonstruktion aus CT-Daten). Neben großen Luftporen sind durch den zugegebenen Schaumbildner entstandene Poren visualisiert
 Fig. 7: 3D image of the lightweight concrete (reconstructed from CT data). In addition to large air voids, pores resulting from the addition of foaming agents are also visualized

ed from various transmission angles for each sectional plane via mathematical transformation. This yields a variable-thickness cross-sectional image of the object of investigation. The present investigations were conducted using a clinical apparatus (SIEMENS Somatom Balance, Fig. 2). An excitation voltage of 130 kV was chosen to ensure penetration of specimens with comparatively high densities. 0.5 mm was selected as the interlayer distance (sectional-plane spacing), as that appeared to be sufficient for the anticipated core ranges and cracks. More than 30 planes were imaged, so the total in-specimen test thickness amounted to at least 15 mm. The resultant data record is a stacked sequence of (DICOM-format) images in which each individual sectional plane appears as a separate gray value image (Fig. 3). Bodies of lower density appear accordingly dark, while bodies of higher density appear accordingly light. Hence, in the clay tile specimen, pores can be differentiated from the matrix, and individual grains of high density (e.g., Fe oxides) can be recognized

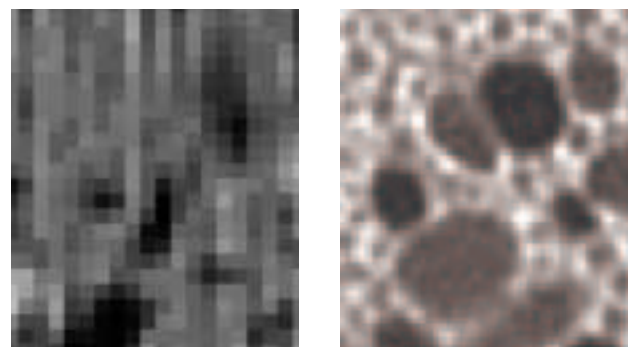


Bild 8: Detaildarstellung des Übergangs von Poren (schwarz) zur umgebenden Matrix (grau) bei der Ziegelprobe (links) sowie des Leichtbetons (rechts). Die Grenze verläuft über mehrere Pixel kontinuierlich (Bildbreite: ca. 0,75 mm bei Ziegel, ca. 5 mm beim Leichtbeton)

Fig. 8: Details of the transition from pores (black) to the surrounding matrix (gray) in the clay tile specimens (at left) and in the lightweight concrete (at right). The boundary continues over several pixels (image width: approx. 0.75 mm for the tile and approx. 0.5 mm for the lightweight concrete)

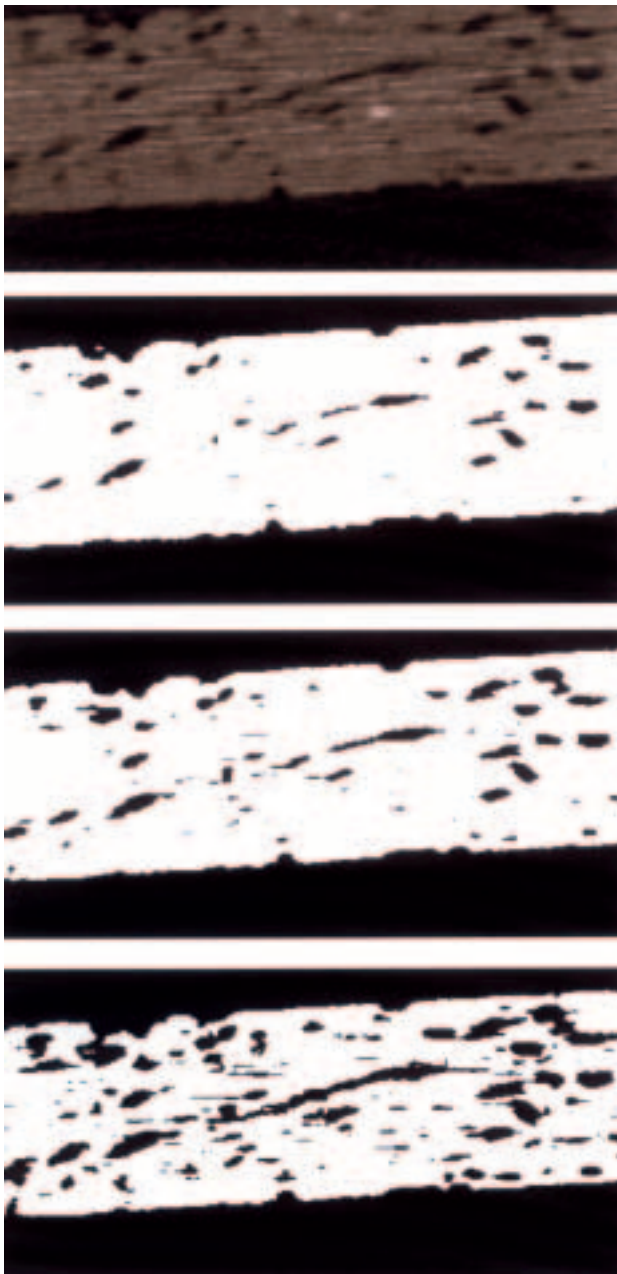


Bild 9: Ausschnitt aus den Rohdaten (oberste Abbildung) und Umrechnung in Binärabbildungen mit verschiedenen Schwellwerten (Thresholds). In der 2. Abbildung von oben beträgt der Schwellwert 20, darunter 50, darunter 80. Beim Schwellwert 80 sind bereits Teilvolumenartefakte als Poren dargestellt
 Fig. 9: Raw-data detail (at top) and conversion to binary images with different thresholds: starting with the second image from the top, the threshold is 20, followed by 50 and, finally, 80. For a threshold of 80, partial-volume artifacts have already begun to appear as pores

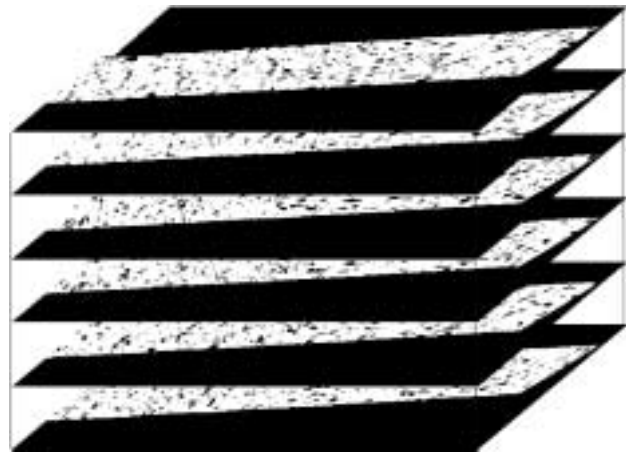


Bild 10: Stapelung der maskierten, binären Abbildungen mit vorgegebenem Schichtebenenabstand
 Fig. 10: Stacking of masked, binary images with predefined sectional-plane spacing

within the matrix (Fig. 3). In lightweight concrete, the black pores stand out against the light-gray matrix (Fig. 4). In high-dynamically loaded concrete, the bombardment-induced cracks are easily discernible (Fig. 5), and the nearly white linear bodies also to be seen there are steel reinforcing fibers. Due to the relatively high densities, or rather differences in density, within the material, especially in the case of solid concrete, the scans are seen to include partial-volume artifacts (interference patterns/fringe patterns) in the images that have to be duly considered for the purposes of subsequent analysis.

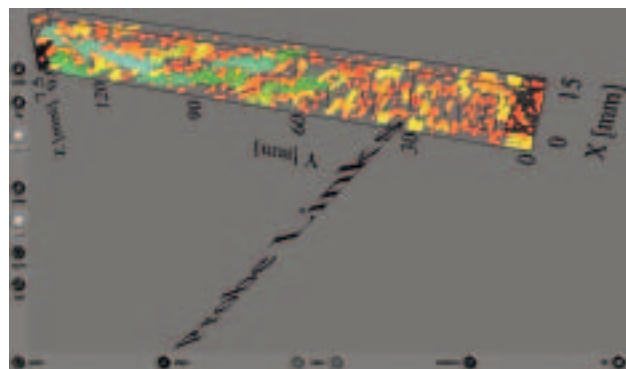


Bild 11: Darstellung der Porenräume der Ziegelplatte (unten) als dreidimensionale RGB-Darstellung sowie der zugehörigen Farbskalierung (oben). Anhand der Darstellung ist zu erkennen, dass Poren der Klassen bis 11 mm³ relativ homogen im untersuchten Ausschnitt vertreten sind. Im linken Probereich ist ein teilweise verbundenes Porensystem erkennbar, welches hohe Volumina aufweist. Diese Poren zeichnen die Textur des Scherbens nach. Möglicherweise wurden Porosierungsmittel bei der Formgebung texturparallel konzentriert und führten nach dem Brand zu der beschriebenen Porenraumstruktur
 Fig. 11: Representation of voids in the clay tile as a 3-dimensional RGB image and of the associated color scale. This view shows that pores in categories extending up to 11 mm³ are fairly homogeneously represented in the examined detail. A partially interconnected, high-volume system of pores in the left parts of the specimen. These pores describe the texture of the body. Perhaps there was a texture-parallel concentration of pore-forming agents during shaping that caused the fired product to display the described void structure

Klasse/Category [mm ³]	RGB-Farben/RGB colours	
	von/from	bis/to
0–4		
5–8		
9–11		
12–17		
18–60		
63–93		

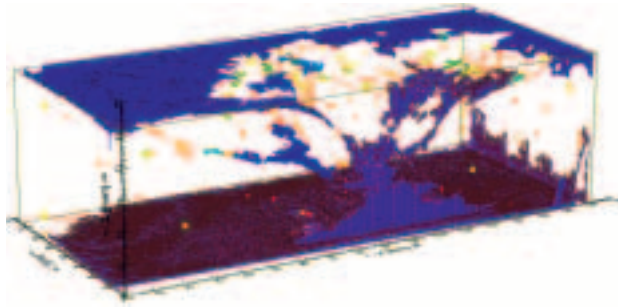


Bild 12: Porenraumauswertung beim hochdynamisch belasteten Beton. Die beim Beschuss entstandenen Großporen sind in dunkelblauen/violetten Farbtönen dargestellt

Fig. 12: Analysis of voids in the high-dynamically loaded concrete. The large voids resulting from bombardment are shown in shades of dark-blue/violet

Daraus ergibt sich, dass keine pauschale Pixelauflösung für alle Probekörper angegeben werden kann. In vorliegenden Fällen wurde die Auflösung anhand der bekannten Geometrien der Probekörper nach den Bildverarbeitungsprozessen ermittelt. Sie betrug

- ▶ bei der Ziegelplatte 0,34 mm in XY-Richtung sowie 0,5 mm in Z-Richtung
- ▶ beim Beschussbeton 0,36 mm in XY-Richtung und 0,5 mm in Z-Richtung
- ▶ beim Leichtbeton 0,33 mm in XY-Richtung sowie 0,5 mm in Z-Richtung

2.3 Porenraumdarstellung

Mittels statistischer Analysemethoden wurden Porenräume unterschiedlichen, vordefinierten Volumenklassen zugeordnet. Im Anschluss erfolgte eine Darstellung der Poren verschiedener Klassen in unterschiedlichen RGB-Farben. Somit erscheinen die Porenräume in einer vordefinierten Farbe, der Matrix wird keine Farbe zugeordnet. In den Bildern 11, 12 und 13 sind Projektionen der 3-D-Abbildungen (Ziegel, Leichtbeton, Beschussbeton) dargestellt.

3 Auswertung

Aus den dreidimensionalen digitalen Datensätzen mit der Information über jedes Voxel im Datensatz lassen sich verschiedene statistische Auswertungen durchführen. Im folgenden Beispiel ist die Auswertung von Volumina zusammenhängender Porenräume in der Ziegelprobe beschrieben. Dabei werden unterschiedliche Klassen (als Porenvolumina in $[\text{mm}^3]$) vordefiniert. Anschließend wird die Anzahl der Poren jeder Klasse statistisch bestimmt. Im nächsten Schritt wird das Volumen jeder Klasse aus Anzahl sowie Volumen jeder Pore in mm^3 bestimmt. Das Ergebnis kann als Histogramm der Porenvolumina je Klasse dargestellt werden. Die Klassenbreite betrug bei der Auswertung 1 mm^3 und wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit auf eine Klassenbreite von 10 mm^3 zusammengefasst.

Aus der Darstellung in Bild 14 ist zu erkennen, dass am häufigsten Poren bis zu einer Klassenbreite von 10 mm^3 auftreten. Es handelt sich um eine Gesamtzahl von 664 Poren, die in Bild 11 in roten und orangen Farben dargestellt sind. Weiterhin treten 10 Poren mit Volumina zwischen 10 und 20 mm^3 auf (hellgelbe bis gelbgrüne Poren in Bild 11). Poren mit Volumina bis 100 mm^3 treten nur vereinzelt auf. Aus den

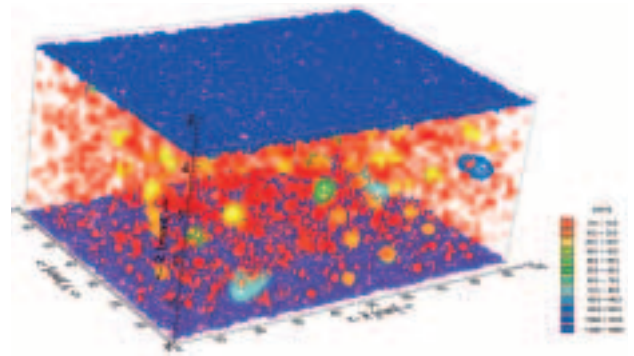


Bild 13: Porenraumdarstellung des Leichtbetons

Fig. 13: Depiction of voids in the lightweight concrete

2.2 Digital image processing

The first step in the generation of 3D analysis is to mask the individual image planes, i.e., certain, identical areas of the images have to be defined for further processing. This has the effect, for example, of excluding zones located outside of the specimen. The thusly obtained details can then be compiled into a 3D image, as for the foamed concrete and dynamically loaded concrete shown in Figs. 6 and 7.

For the analysis of voids and cracks, all that is of interest is the difference between the gray scale values of the pores/cracks and those of the matrix. While at first glance the pores appear "black" and the matrix "gray", a closer look reveals a gradual transition in gray scale values between pore and matrix (Fig. 8). When the images are converted into a binary image, it is therefore necessary to define a threshold below which the gray scale values count as pores, and above which the gray scale values count as matrix.

Fig. 9 exemplifies the effects of different thresholds for the clay tile. In the present investigation, the threshold was set a gray scale value of 73 on the basis of visual comparison between the binary data and the digital CT image of a given sectional plane. For a lower threshold, the pores are under-represented, and for a higher threshold, the artifacts shown in Fig. 3 increasingly appear as voids.

Following masking and binarization, the image planes are stacked, with care being taken to achieve accurately fit inter-layer distance (sectional-plane spacing) as set for the CF scan (Fig. 10).

In the thusly obtained stack of images, superjacent pore and matrix regions are connected by the gaps between the stacks. By converting the two-dimensional pixels, the stacked 2-dimensional pore images are turned into 3-dimensional pore models, the extent and/or volume of which can be computed by way of calibration (e.g., across the overall width of the object of investigation). The gray scale value 0 (= pore) or 255 (= matrix) is assigned to each voxel, resulting in a data record that contains and offers information about voids in all spatial directions.

The lateral pixel resolution is primarily apparatus-specific, depending for one on the material density and for another on the scanning parameters. Moreover, image processing techniques can be used for modifying the pixel resolution. It follows, then, that there is no global pixel resolution that could be stated for all specimens. In the present cases, the resolution was determined on the basis of the known specimen geometries subsequent to image processing. The resolution amounted to:

zugehörigen Porenvolumina ist ersichtlich, dass ein bedeutender Porenvolumenanteil durch die Poren bis 10 mm^3 ausgemacht wird. In Bild 15 sind die Porenvolumina auf das Gesamtvolumen aller Porenräume von ca. $1\,500\text{ mm}^3$ bezogen. Demnach beträgt der Volumenanteil der Poren bis 10 mm^3 ca. 50 % an der Gesamtporosität. Die volumenreicheren Poren liegen bei maximal 10 % Anteil am Gesamtvolumen je Klasse.

Im Folgenden wurde eine logarithmische Skalierung der Porenklassen gewählt, um die Volumina der vielen feinen Poren auflösen zu können. Es erfolgte eine Einteilung in Feinporen mit Volumina bis 1 mm^3 , Mittelporen von 1 mm^3 bis 10 mm^3 sowie Grobporen von 10 mm^3 bis 100 mm^3 (Bild 16). Das resultierende Verhältnis zwischen Porenzahl und Porenvolumen ist in der Bild 14 dargestellt. Feinporen sind die häufigsten Poren, ihr Gesamtvolumen ist jedoch vergleichsweise gering. Grobporen treten zwar hinsichtlich ihrer Zahl untergeordnet auf, dafür enthalten sie ein hohes Porenvolumen.

Aus dem Verhältnis des ermittelten Porenraumes in mm^3 und dem bekannten Volumen des Probekörpers lässt sich die Porosität bezüglich der o. g. Porengrößen ermitteln. Sie liegt in dieser Ziegelprobe bei 10,6 %.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde dargestellt, wie mittels Computertomografie unterschiedliche Materialien (Ziegel, Leichtbeton, Massivbeton) hinsichtlich ihrer strukturellen Ausbildung erfasst und dreidimensional dargestellt werden können. Weiterhin erfolgte eine dreidimensionale Porenraumdarstellung, bei der die Poren bezüglich ihrer Volumina klassifiziert und die unterschiedlichen Klassen in verschiedenen Farben dargestellt wurden. Aus den generierten Datensätzen lassen sich unterschiedliche statistische Auswertungen durchführen. Im vorliegenden Beispiel wurde eine einfache Auswertung hinsichtlich der Porenvolu-

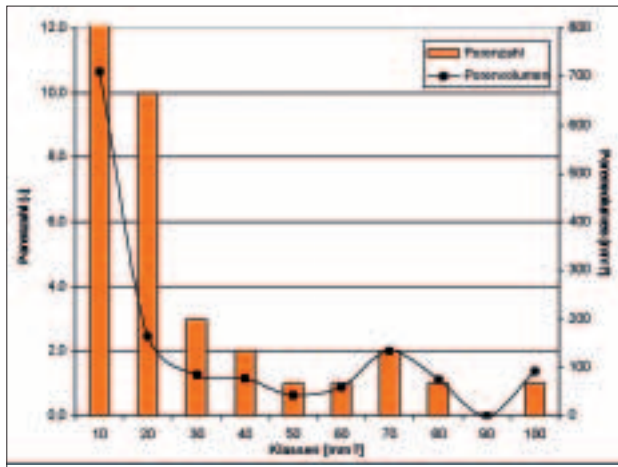


Bild 14: Darstellung der Porenanzahl sowie der zugehörigen Porenvolumina im untersuchten Scherben. Zur besseren Darstellung ist die Porenzahl nur bis 12 dargestellt. Die Anzahl der Poren bis 10 mm^3 liegt allerdings bei 664. Weitere Erläuterungen siehe Text

Fig. 14: Histogram of pore quantity and associated pore volumes in the examined body. For the sake of clarity, only void ratios of 12 or less are shown. The number of pores with volumes up to 10 mm^3 , however, amounts to 664. Please refer to text for elucidation

- ▶ 0.34 mm in XY direction and 0.5 mm in Z direction for the clay tile
- ▶ 0.36 mm in XY direction and 0.5 mm in Z direction for the bombarded concrete
- ▶ 0.33 mm in XY direction and 0.5 mm in Z direction for the lightweight concrete.

2.3 Void imaging

Voids were assigned to different, predefined volume categories according to methods of statistical analysis. Then, the pores in the various categories were imaged in various RGB colors. Hence, the voids appear in a predefined color, while no color is assigned to the matrix. Figs. 11, 12 and 13 are 3D projections of the tile, the lightweight concrete and the bombarded concrete.

3 Analysis

The three-dimensional digital data records containing information on each voxel in the record lend themselves to various forms of statistical analysis. The following example describes the analysis of coherent void volumina in the clay tile specimen. In that connection, different categories (of pore volumes [mm^3]) are predefined. Then, the number of pores per category is statistically determined. The next step is to determine the volume of each category based on the quantity and volume of each pore, in mm^3 . The results can be shown as a histogram of pore volumes per category. The bin width, i.e., the category width, for analysis was 1 mm^3 , but was pooled to 10 mm^3 for the sake of clarity.

Fig. 14 shows that the most frequent pores are those occurring for bin widths up to 10 mm^3 . There was a total number of 664 pores, as shown in red and orange in Fig. 11. There

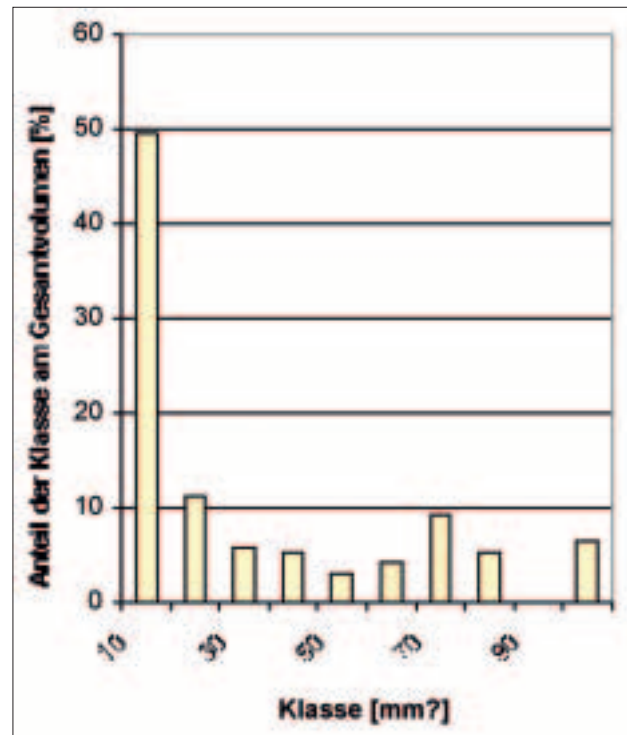


Bild 15: Darstellung der Porenvolumina der jeweiligen Klassen bezogen auf das Gesamtporenvolumen der Probe
 Fig. 15: Histogram of pore volumes per category, specific to the total pore volume of the clay tile specimen

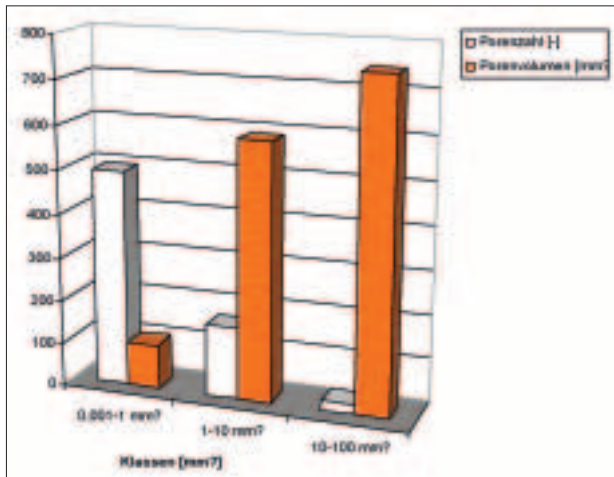


Bild 16: Unterteilung in Feinporen (bis 1 mm^3), Mittelporen ($1-10 \text{ mm}^3$) und Grobporen ($10-100 \text{ mm}^3$) und deren Anteile hinsichtlich Porenzahl und Porenvolumen. Erläuterungen siehe Text

Fig. 16: Breakdown of pores sizes as fine (up to 1 mm^3), medium-size ($1-10 \text{ mm}^3$) and large ($10-100 \text{ mm}^3$) and their respective proportions with regard to number of pores and pore volumes. Please refer to text for elucidation

mina bzw. der Häufigkeit unterschiedlicher Volumenklassen durchgeführt. Neben dieser Form der Auswertung sind weitere Porenraumcharakterisierungen möglich, z. B.:

- ▶ Erstellung von Porenradialverteilungen ähnlich den klassischen Auswertungen der Quecksilberdruckporosimetrie (Feinporenbereich)
- ▶ Berechnung von Porenoberflächen/internen Oberflächen von Proben hinsichtlich der auflösbaren Poren
- ▶ Erstellung von Porenradialverteilungen mit Differenzierung der Porenradial nach Raumrichtung (Beschreibung der Ausrichtungsverhältnisse von Poren und somit der textuellen Merkmale einer Probe)
- ▶ Beschreibung von Porengeometrien bzw. Vernetzungsgrad von Poren
- ▶ Charakterisierung von Rissbildern (Risslängen, Rissweiten, Vernetzungsgrad von Rissen)

Literatur

- [1] DIN EN 480-11: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel; Prüfverfahren. Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton. Februar 1999
- [2] Hecker, J. M.; Berkenhagen, J.; Diestel, H. (2003): Computertomografie in der Bodenkunde: Methoden und Anwendungen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 101: 25–26
- [3] Joschko, M.; Graff, O.; Müller, P. C.; Kotzke, K.; Lindner, P.; Pretschner, D. P. and Larink, O. (1991): A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm burrow systems in three dimensions by X-ray computed tomography. Biol. Fert. Soils 11, 88–92
- [4] Sander M.; Schüller H. (2000): Computertomografie in der Paläontologie. Fossilien-Zeitschrift für Hobbypaläontologen 3, 159–164
- [5] Heidt, H.; Goebbels, J. (1985): Radiometrie und rechnergestützte Durchstrahlungsverfahren für die Erkennung von Betonschäden. ZfP Bau-Symposium „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen“ DGZfP Berichtsband S. 170–177 Berlin, 2.–3. Oktober 1985
- [6] Mucha, S. (2004): Nondestructive experimental approach to HPC fatigue damage. LACER, 9, p. 317–333
- [7] Illerhaus, E. Jasiuniene, J. Goebbels (2001): Messungen von Eigenschaften poröser Materialien in 3D mittels Mikro-Computertomografie. DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung 2001
- [8] Keuser, M.; Thienel, K.-Ch.; Bludau, Ch.; Kustermann, A.: Beschussversuche an Schutzelementen aus hochfestem Beton. Proceedings. Münchener Massivbau Seminar 2004, Springer Verlag, April 2004

were also 10 pores with volumes ranging from 10 to 20 mm^3 (light-yellow to yellowish green pores in Fig. 11). Only a few scattered pores with volumes up to 100 mm^3 were found. The corresponding pore volumes show that pores with volumes up to 10 mm^3 account for a considerable share of the overall volume. In Fig. 15, the pore volumes are specific to the total voids volume of some $1,500 \text{ mm}^3$. Accordingly, pores measuring up to 10 mm^3 account for roughly 50% of the overall porosity. The higher-volume pores only account for, at most, 10% of the total volume per category (bin).

For the following, the pore categories were given a logarithmic scale to enable better resolution of the volumes of the numerous small pores. The pores were assigned to the categories fine pores (with volumes up to 1 mm^3), medium-size pores (from 1 mm^3 to 10 mm^3), and large pores (from 10 mm^3 to 100 mm^3 , Fig. 16). The resultant ratio between the number of pores and the pore volume is shown in Fig. 14. The fine pores were the most frequent, but they nevertheless accounted for a comparatively small total volume. While there was only a much smaller number of large pores, they accounted for a large pore volume.

Dividing the thusly determined pore volume, in mm^3 , by the known volume of the specimen yields the porosity in terms of the aforementioned pore sizes. In the case example (heavy clay tile) this amounts to 10.6 %.

4 Summary and prospects

It was explained how different materials (heavy clay, light-weight concrete, high-strength concrete) can be distinguished according to microstructure and imaged in three dimensions with the aid of computed tomography. Also, three-dimensional imaging of voids was engaged in, including classification of pores according to volume, with the various categories depicted in different colors. The generated data records enable various forms of statistical analysis. In the present example, the analysis was confined to pore volumes and the frequency of the various volume categories. Beyond that, various other forms of void characterization are possible, e.g.:

- ▶ compilation of pore-size distributions similar to the classical mercury porosimetry studies (fine-pores range)
- ▶ calculation of pore surfaces/internal surfaces of pores with respect to resolvable pores
- ▶ generation of pore-size distributions with differentiation of pore sizes according to direction in space (description of the orientation situation of the pores and, hence, of the textural characteristics of a specimen)
- ▶ description of pore geometry and pore connectivity
- ▶ characterization of cracking patterns (crack lengths, crack widths, connectivity of cracks)

Literature

- [1] DIN EN 480-11: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel; Prüfverfahren. Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton. Februar 1999
- [2] Hecker, J. M.; Berkenhagen, J.; Diestel, H. (2003): Computertomografie in der Bodenkunde: Methoden und Anwendungen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 101: 25–26
- [3] Joschko, M.; Graff, O.; Müller, P. C.; Kotzke, K.; Lindner, P.; Pretschner, D. P. and Larink, O. (1991): A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm burrow systems in three dimensions by X-ray computed tomography. Biol. Fert. Soils 11, pp. 88–92

- [4] Sander M.; Schüller H. (2000): Computertomografie in der Paläontologie. Fossilien-Zeitschrift für Hobbypaläontologen 3, 159–164
- [5] Heidt, H.; Goebbels, J. (1985): Radiometrie und rechnergestützte Durchstrahlungsverfahren für die Erkennung von Betonschäden. ZfP Bau-Symposium „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen“ DGZfP Berichtsband S. 170–177 Berlin, 2.–3. Oktober 1985
- [6] Mucha, S. (2004): Nondestructive experimental approach to HPC fatigue damage. LACER, 9, pp. 317–333
- [7] Illerhaus, E. Jasiuniene, J. Goebbels (2001): Messungen von Eigenschaften poröser Materialien in 3D mittels Mikro-Computertomografie. DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung 2001
- [8] Keuser, M.; Thienel, K.-Ch.; Bludau, Ch.; Kustermann, A.: Beschussversuche an Schutzelementen aus hochfestem Beton. Proceedings. Münchener Massivbau Seminar 2004, Springer Verlag, April 2004