Anwendung der Computer-Tomographie auf Beton

Autor(en): **Schwander, Peter / Rösli, Alfred**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 5

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75403

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Anwendung der Computer-Tomographie auf Beton

Von Peter Schwander und Alfred Rösli, Zürich

Computer-Tomographie (CT) mit Hilfe von Röntgenstrahlen, wie sie seit einigen Jahren in der Medizin angewendet wird, bietet sich als zerstörungsfreie Methode an, die auch die klassischen Methoden der Betonforschung in sinnvoller Weise ergänzen kann. Das Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (IBWK) der ETH Zürich führt seit etwa einem Jahr Versuche am Baustoff Beton durch, um diese vielversprechende Methode auf ihre Eignung hin zu prüfen. Der vorliegende Aufsatz berichtet über erste experimentelle Ergebnisse und Erfahrungen mit dieser Technik.

Einführung

Der Baustoff Beton ist ein zusammengesetztes Material, das aus mineralischen Zuschlagstoffen und der durch Reaktion von Wasser und Bindemittel durch Verfestigung entstandener Matrix besteht. Man kann ihn auch als Konglomerat aus Mörtel, bestehend aus dem Bindemittel und dem kleineren, sandartigen Zuschlag sowie den grösseren Zuschlagkörnern, auffassen.

Zur Beurteilung mechanischer Eigenschaften wie z. B. der Zug- und Druckfestigkeit ist die Art, wie die verschiedenen Bestandteile (Phasen) des Betons zueinander stehen, also das *Gefüge*, von grosser Wichtigkeit. Dabei spielt z. B. die Form- und Grössenverteilung (Siebkurve) der Zuschlagstoffe eine entscheidende Rolle. Für andere Eigenschaften wie Frost- und Tausalzbeständigkeit sind die Porositätsverhältnisse des Zementsteins, insbesondere der Anteil und die Verteilung der Luftporen, bedeutsam.

Wie überall in der Materialforschung gilt auch hier die Regel, dass eine einzige Untersuchungsmethode nicht ausreicht, um ein gegebenes Material hinreichend zu beschreiben. So sind zur Bestimmung des *Betongefüges* sowie seiner *Porositätseigenschaften* verschiedene *klassische Methoden* entwickelt worden, wobei *Lichtmikroskop, Aufsaugversuche* mit Wasser bzw. Salzlösungen und *Quecksilberporosimetrie* die wichtigsten Vertreter sind [1]. Die Computer-Tomographie mittels Röntgenstrahlen, im folgenden abgekürzt mit CT bezeichnet, wie sie in den letzten Jahren intensiv in der Medizin verwendet wird, bietet sich als neues Untersuchungsmittel in der Betonforschung an. Die CT arbeitet dabei *völlig zerstörungsfrei* und kommt *ohne jegliches Präparationsverfahren* aus. Durch die simultane Messung des sog. *Röntgenabsorptionskoeffizienten* an verschiedenen Stellen im Material gehen wichtige Eigenschaften des Prüfkörpers ein. So lassen sich die Zuschlagstoffe sowie Inhomogenitäten im Betongefüge direkt abbilden. Ausserdem können Porositätsmessungen durchgeführt werden, wie sie mit anderen Methoden in so kurzer Zeit kaum möglich sind. Vergleiche mit bekannten Methoden zeigen, dass diese mittels der CT in sinnvoller Weise unterstützt und ergänzt werden können. Da die CT zu der eher bescheidenen Zahl der zerstörungsfreien Materialprüfmethoden gehört, wird sie in den kommenden Jahren bestimmt Anwendungen in der Materialforschung und -prüfung finden [2]. Nachstehend werden vor allem mögliche Anwendungen am Baustoff Beton beschrieben.

Das Prinzip

Unter Tomographie (Tomos: griech. Schnitt), im deutschen Sprachgebrauch oft auch als *Schichtbildaufnahmetechnik* bezeichnet, wird ein zerstörungsfreies Abbildungsverfahren verstanden, das eine Darstellung einer ebenen Schicht des Objektkörpers erlaubt, deren Tiefe und Dicke nach Belieben gewählt werden kann. Obwohl die Entwicklung solcher Techniken bisher vor allem durch ihre Anwendungen in der Medizin mitbestimmt wurde, besteht auch in Gebieten wie der angewandten Materialwissenschaft ein ständig zunehmendes Interesse. Die CT, wie sie heute verwendet wird, war nicht eine plötzliche Erfindung der 70er Jahre, sondern hat sich stetig aus radiographischen und radiometrischen Methoden (Durchstrahlungsmethoden) entwikkelt, die sich bis 1895, dem Entdekkungsjahr der Röntgenstrahlung durch *W. K. Röntgen*, zurückführen lassen.

Röntgenstrahlen (englisch X-rays) haben die Eigenschaft, auch lichtundurchlässige Materie durchdringen zu können. Darauf beruhen viele zerstörungsfreie Prüfverfahren wie z. B. die Radiographie und die Radiometrie. Bei der Radiometrie wird das Prüfobjekt mit einem Röntgenstrahl, wie er von einer konventionellen Röntgenröhre erzeugt wird, durchleuchtet (Bild 1).

Die *Intensität* des durchgehenden (transmittierten) Strahls wird dann von einem Intensitätsmesser, einem sog. *Detektor*, gemessen und mit der Intensität des einfallenden Strahls verglichen. Dabei gilt bei einem homogenen Material folgendes grundlegendes physikalisches Gesetz:

(1) $I_t = I_0 \cdot e^{-\mu x}$

I_0 : Intensität des einfallenden Strahls
I_t : Intensität des transmittierten Strahls
x : Dicke des Materials [cm]
μ : linearer Absorptionskoeffizient [cm^{-1}]

μ ist der lineare Absorptionskoeffizient, ein Mass für die Eigenschaft, Röntgenstrahlen abzuschwächen. Er ist von der chemischen Zusammensetzung und der Dichte des Materials, aber auch von der Art der Strahlung, genauer dem Röntgenspektrum, abhängig. Schwere Elemente wie z. B. die Metalle absorbieren dabei stärker als die leichteren.

Bei einem inhomogenen Material, das aus verschiedenen Phasen mit i.a. ungleichen Absorptionskoeffizienten besteht, ist μ im Objektkörper ortsabhängig. Dabei ist es nützlich, das Objekt mit einem Bündel paralleler Röntgenstrahlen zu durchleuchten (Bild 2).

Bild 1. Absorption von Röntgenstrahlen im Objekt

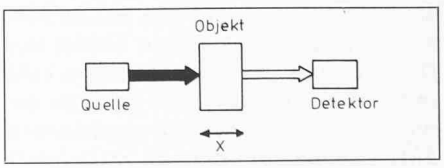
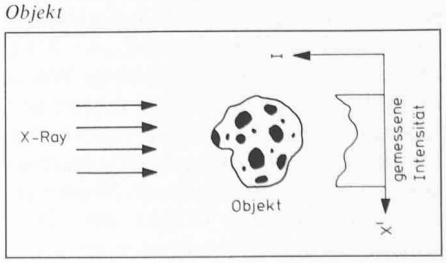


Bild 2. Intensitätsverteilung paralleler Röntgenstrahlen bei der Absorption in einem inhomogenen Objekt



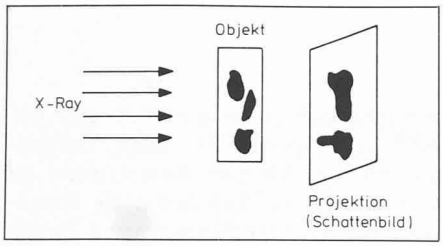


Bild 3. Überlappung der Projektion hintereinanderliegender Inhomogenitäten

Bei einfachen Materialien liefern solche *Intensitätsverteilungen* ein anschauliches Bild der Dichteverhältnisse im Werkstoff. So hat sich dieses Verfahren z. B. bei Metallen zur Aufdeckung von Einschlüssen, Lunkern und Rissen als nützlich erwiesen. Trotzdem ist die Interpretation solcher Bilder im allgemeinen nicht einfach, da beim Durchleuchten immer eine Projektion in Strahlrichtung entsteht, womit jegliche Information über die Tiefenlage verlorengeht. Ausserdem ist zu beachten, dass hintereinanderliegende Inhomogenitäten nicht mehr voneinander unterschieden werden können, falls sie sich in der Projektion überlappen (Bild 3). Offenbar ist diese Methode nur dann anwendbar, wenn die Zahl und Grösse der Inhomogenitäten verhältnismässig klein ist. Es ist klar, dass das beim Beton mit seinem komplizierten Gefüge nicht der Fall sein kann. Von der Seite der Radiologen entstand schon früh der Wunsch, anstatt ein Intensitätsprofil aufzunehmen, eine ganz *bestimmte Schicht scharf abzubilden*. Obwohl man dazu viele Verfahren erfunden und ausprobiert hatte, konnte man dieses Problem bis vor kurzem nicht in befriedigender Weise lösen. Eine Übersicht über die wichtigsten Vertreter dieser Verfahren ist in [3] enthalten. Alle diese Techniken hatten aber den Nachteil, dass auch benachbarte Schichten in irgendeiner Weise unscharf mitabgebildet wurden und somit den Bildkontrast verschlechterten. Die schnelle Entwicklung der *Elektronik* in den letzten Jahren, insbesondere auf dem Gebiet der *Digitaltechnik*, sollte die Situation bald verbessern. Im Jahre 1971 kündigte die englische Firma EMI den sogenannten *EMI-Scanner* an, der in raffinierter Weise ein Röntgengerät mit einem Digitalcomputer verbindet. Damit wurde eine neue Ära in der Röntgentechnik eingeleitet, der man den Namen Computer-Tomographie gab (auf englisch Computerized-Tomographie = CT). Das Prinzip ist in vereinfachter Weise in Bild 4 dargestellt. Dabei nimmt der sogenannte Scanner mittels rotierender Detektoren und Röntgenquelle Intensitätsprofile in verschiedenen Winkellagen rund um das Objekt auf. Dies scheint auf den ersten Blick noch nicht viel zu nützen, da die einzelnen Aufnahmen jeweils nur aus Projektionen der Struktur bezüglich der jeweiligen Strahlrichtung bestehen. Trotzdem bekommt man eine Idee, was hinter diesem Prinzip stecken könnte: die Information, die bei einer bestimmten Projektion verlorengeht, ist eben in einer anderen mit unterschiedlicher Winkellage teilweise enthalten. Man kann sogar beweisen, dass das gewünschte Bild in der Menge aller Projektionen enthalten ist, nur eben in einer sehr unanschaulichen und verschlüsselten Form.

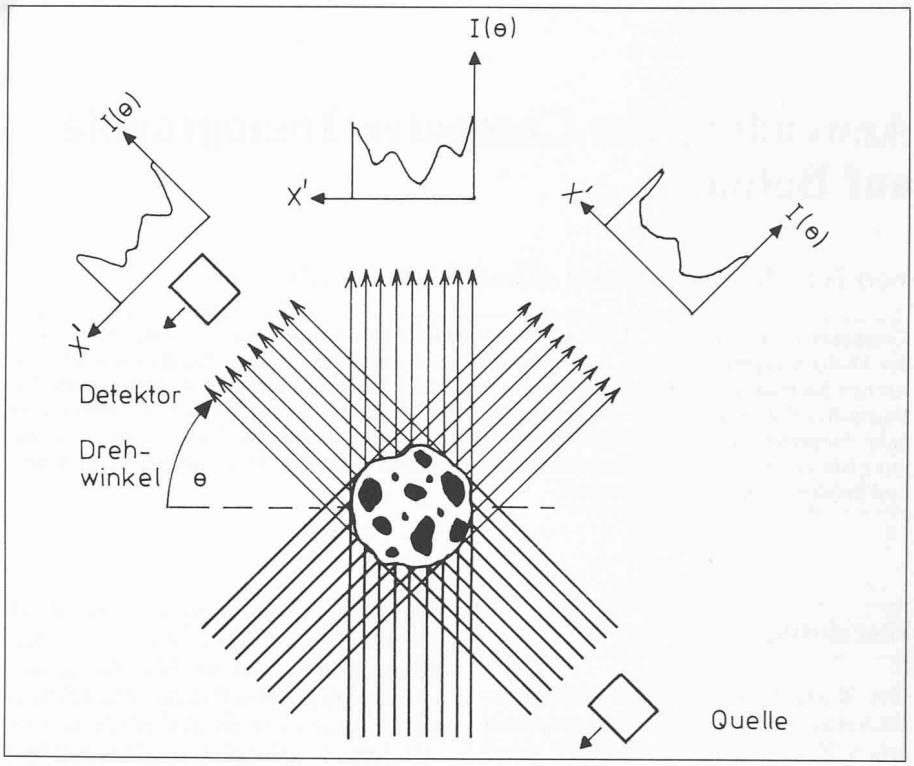


Bild 4. Prinzip der Computer-Tomographie: mittels beweglichen Detektors und Röntgenquelle werden Intensitätsprofile in verschiedenen Winkellagen (Drehwinkel Θ) rund um das Objekt aufgenommen

Die Berechnungsverfahren, die dieses mathematische Problem lösen, werden als *Rekonstruktionsalgorithmen* bezeichnet. Die praktische Anwendung solcher Rekonstruktionsverfahren ist, da diese sehr viele Rechenoperationen benötigen, erst mit modernen Digitalrechnern realisierbar geworden. Dazu sind eine Fülle von verschiedenen Algorithmen erdacht worden, die aber alle im wesentlichen als etwa gleichwertig zu betrachten sind [4]. Bei den meisten kommerziellen Tomographen verwendet man jedoch aus praktischen Gründen das sogenannte *Faltungsverfahren mit anschliessender Rückprojektion*, meistens mit dem entsprechenden englischen Namen *Convolution-Backprojection* bezeichnet. Weiter soll hier nicht auf die mathematischen und physikalischen Aspekte der CT eingegangen werden, sondern vielmehr die möglichen Anwendungen dieser Methode in der Betonforschung beschrieben werden.

Vorgehen

Die *Prüfkörper* werden am besten *zylinderförmig* zugeschnitten und mit einer geeigneten Halterung am Tomograph befestigt. Beim vorhandenen Gerät sind dabei Durchmesser bis zu maximal 160 mm möglich. Mit entsprechend grösseren Tomographen, wie sie heute in Krankenhäusern für Ganzkörpertomographie verwendet werden, sind Durchmesser von 500 mm und mehr ohne weiteres möglich. Bei der Strahlungsquelle handelt es sich um eine Röntgenröhre mit Wolframanode mit einem zusätzlichen Kupferplättchen als Filter (Monochromator). Vor der Aufnahme müssen Parameter wie Röhrenspannung, Anzahl der Winkel und Aufnahmezeit vorgewählt werden. Dabei hängt die Qualität der Aufnahme entscheidend von diesen Werten ab. Der Aufnahmevorgang wird vom Scanner selbständig übernommen. Nach ein paar Minuten, was wiederum von den Aufnahmeparametern bestimmt wird, erscheint das rekonstruierte Tomogramm auf einem Videobildschirm. Das Bild besteht aus einer quadratischen Anordnung von 256×256 (= 65 536) farbigen bzw. schwarz-weissen Bildpunkten. Bei der Aufnahme können auch Schrittaufnahmen gemacht werden, wobei eine Serie von Tomogrammen in verschiedenen Abständen parallel zur Tomographenachse aufgenommen werden. Die Schrittweite kann dabei vorgewählt werden und beträgt minimal 1 mm.

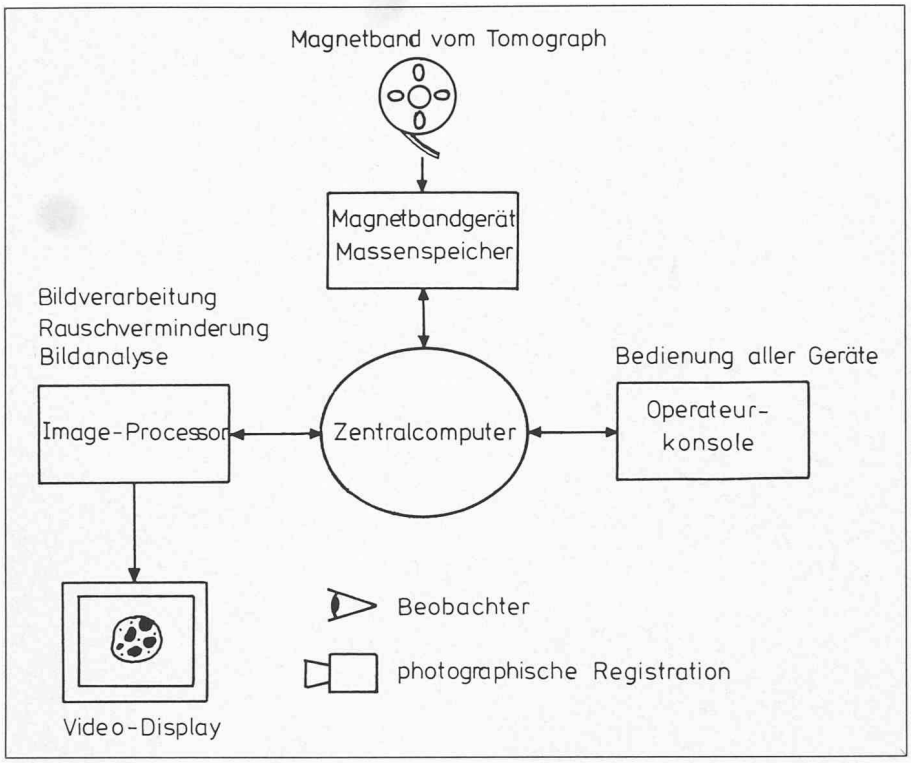


Bild 5. Typische Konfiguration einer modernen Bildverarbeitungsanlage

Um Tomogramme zu *archivieren*, bestehen verschiedene Möglichkeiten. Erstens können die Bilder *photographisch* registriert werden, was für eine spätere qualitative Beurteilung nützlich sein kann. Zweitens können sie auch *in Form von digitalen Daten*, entsprechend den numerischen Werten des Absorptionskoeffizienten, auf konventionellen Datenträgern wie Magnetband und Disk aufbewahrt werden. So können sie z. B. später mit modernen *Bildverarbeitungsmethoden* weiter analysiert und ausgewertet werden.

Versuche

Für die experimentellen Untersuchungen wurden *drei Standardbetonsorten:* Normalbeton W/Z = 0,5, Normalbeton W/Z = 0,57 und Luftporenbeton (5% LP) je mit 300 kg Zement je Kubikmeter der EMPA Dübendorf verwendet. Diese wurden aus speziell hergestellten Betonwänden entnommen. Im Hinblick auf eine möglichst gute Auflösung am Tomograph wurden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 18 mm gewählt. Es wurden aber auch Proben mit Durchmessern von 50 mm und 100 mm verwendet.

Um die entscheidenden Aufnahmeparameter möglichst gut an den Beton anzupassen, wurde die Röhrenspannung der Röntgenquelle auf den Maximalwert von 80 kV eingestellt, wobei eine höhere Spannung günstiger gewesen wäre. Weiter wurde die Anzahl der Winkelaufnahmen (Projektionen) auf 128 und die Zahl der Messungen innerhalb jeder Projektion auf 256 gewählt.

Bild 6 zeigt die Tomogramme der drei verschiedenen Betonsorten, wie sie in einem Abstand von etwa 2 mm von der Schalungsoberfläche entnommen wurden. Um den Kontrast zwischen der Zementmatrix und den Zuschlagstoffen zu vergrössern, wurde eine sog. *Falschfarbendarstellung* (Pseudocolor) verwendet. Dabei werden unterschiedlichen Werten des Absorptionskoeffizienten verschiedene Farben zugeordnet. Im Tomogramm erscheinen kleine Werte (entsprechend Poren und Hohlräumen) rot, Stellen mit hohen Werten (entsprechend den schweren Zuschlagstoffen) blau und mittlere Werte (entsprechend der Zementmatrix bzw. dem Mörtel) gelb oder grün. Besonders gut erkennbar sind die Hohlräume und die grossen Luftporen. Das praktisch erreichte Auflösungsvermögen des Gerätes liegt dabei zwischen 0,3 bis 1 mm.

Um die Tomogramme *statistisch auszuwerten*, wurden spezielle Computerprogramme geschrieben. Dabei wird z. B. über alle Bildpunkte innerhalb eines sogenannten «Fensters» variabler Grösse gemittelt sowie die mittlere quadratische Abweichung von diesem Mittelwert bestimmt (Standardabweichung). Mit solchen statistischen Methoden kann der Absorptionskoeffizient quantitativ bestimmt werden. Tab. 1 zeigt den damit ermittelten Absorptionskoeffizienten, gemittelt über jeweils drei verschiedene Stellen im Tomogramm innerhalb eines Fensters von jeweils 11×11 (= 121 Punkten). Dabei wurde mit besonderer Sorgfalt beachtet, dass man in jedem Fall an Stellen zwischen den grossen Zuschlagkörnern misst, so dass der erfasste Absorptionskoeffizient dem des Mörtels entspricht. Um zusätzlich eine Abhängigkeit vom Abstand der Schalungsfläche zu überprüfen, wurden die Messungen für verschiedene Abstände wiederholt (Tab. 2). Solche Messungen sind mit anderen, nicht zerstörungsfreien Methoden sehr mühsam und im allgemeinen schlecht reproduzierbar.

Tab. 1. Mittlere Absorptionskoeffizienten μ der drei untersuchten Betonsorten

	μ [cm^{-1}]
NB 0,5	0,61 ± 0,01
NB 0,57	0,62 ± 0,03
LP 5%	0,54 ± 0,02

Tab. 2. Abhängigkeit der Absorptionskoeffizienten μ in Funktion des Abstandes von der Schalungsoberfläche

μ [cm^{-1}]	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
NB 0,5	0,62	0,62	0,64	0,65
NB 0,57	0,65	0,62	0,63	0,64
LP 5%	0,52	0,54	0,55	0,59

Anwendungen in der Betonforschung

Bis jetzt wurde über die Messung und die Art der Erfassung des Röntgenabsorptionskoeffizienten berichtet und gezeigt, dass dieser an jeder beliebigen Stelle im Objektkörper bestimmt werden kann. Hier geht es nun darum, diesen zu interpretieren, d. h. in mit anderen, bekannten Betoneigenschaften in Verbindung zu setzen.

Porosität

Die Porosität eines Körpers ist definiert als

$$(2) \quad P = 1 - \frac{\varrho}{\varrho_0}$$

mit ϱ_0 Reindichte
ϱ Rohdichte

Unter gewissen vereinfachenden Annahmen kann man aus dem Absorptionskoeffizienten die Porosität des Zementmörtels verschiedener Betonsorten bestimmen. Dabei nehmen wir an, dass der Zementmörtel aus einer quasi-

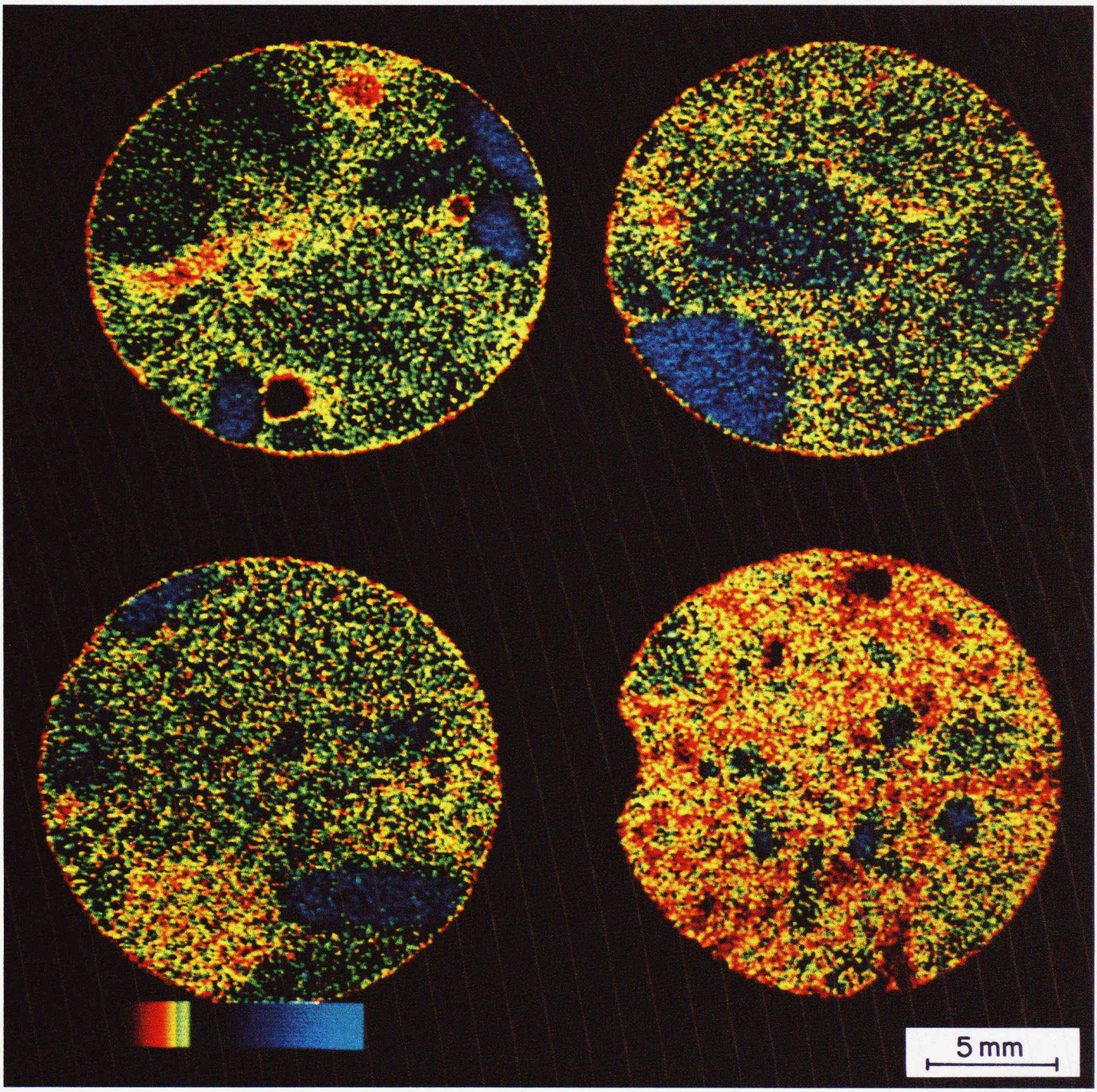


Bild 6. Oben rechts Normalbeton W/Z = 0,5, unten links Normalbeton W/Z = 0,57, unten rechts Luftporenbeton mit 5% LP, oben links befindet sich ein weiterer Normalbeton ohne weitere Angaben.
Die Tomogramme wurden anhand zylindrischer Proben (Durchmesser 18 mm) jeweils im Abstand von 2 mm von der Schalungsoberfläche aufgenommen. Bei der Farbdarstellung erscheinen Stellen mit kleinen Werten des Absorptionskoeffizienten (entsprechend Poren und Hohlräumen) rot, Stellen mit hohen Werten (Zuschlagstoffe) blau und mittlere Werte (Zementmatrix) gelb und grün. Grössere Hohlräume erscheinen ganz schwarz

homogenen Masse besteht. Diese Annahme ist gerechtfertigt, falls die feinkörnigen sandartigen Zuschlagstoffe jeweils ähnlich beschaffen und im Beton gleichmässig verteilt sind. Dann gilt nämlich, dass der Quotient:

$$(3) \quad m = \frac{\mu}{\varrho}$$

aus dem Absorptionskoeffizienten und der zugehörigen Rohdichte konstant ist und somit nicht von der Porosität abhängt. Dabei wird m als Massenabsorptionskoeffizient bezeichnet. Setzt man ϱ aus dem Ausdruck (3) in die Formel (2) ein, so ergibt sich sofort:

$$(4) \quad P = 1 - \frac{\mu}{m \cdot \varrho_0}$$

Damit lässt sich bei bekanntem m und ϱ_0 die Porosität verschiedener Betonarten durch eine einfache Messung des entsprechenden μ mit Hilfe der Formel (4) angeben. Dabei muss natürlich gewährleistet sein, dass das ϱ_0 und das m der zu untersuchenden Betonsorten ungefähr gleich sind. Das ϱ_0 liegt in einem Bereich zwischen 2,65–2,71 g/cm³ und ist damit also recht unproblematisch.

Um das m möglichst genau zu bestimmen, wurde das entsprechende μ an mechanisch gepulverten Proben bestimmt. Die Messung ergab einen Wert von $m = 0{,}28 \pm 0{,}01\ g^{-1}\ cm^2$.

Schreiben wir nun noch das Produkt von ϱ_0 und m als

$$(5) \quad \frac{1}{k} = m \cdot \varrho_0$$

dann lässt sich (4) schreiben als

$$(6) \quad P = 1 - k \cdot \mu$$
$$\text{mit } k = 1{,}33 \pm 0{,}05\ \text{cm}$$

Tab. 3. Vergleich gemessener Porositätswerte aus den beiden Methoden Tomographie und Aufsaugversuch

P [%]	Tomographie	Aufsaugversuch
NB 0,5	15,8 ± 3%	13,6%
NB 0,57	15,5 ± 3%	14,8%
LP 5%	26,8 ± 3%	19,7%

Tab. 3 zeigt das Ergebnis der Bestimmung der Porosität aus dem Röntgenabsorptionskoeffizienten der drei Betonsorten, verglichen mit typischen Werten, wie sie aus Aufsaugversuchen bestimmt wurden. Dazu ist zu bemerken, dass die Messungen wohl an den gleichen Betonsorten, jedoch nicht an denselben Probekörpern durchgeführt werden konnten. Für eine Abschätzung der Porosität wird diese Methode für die Praxis genügen und den anderen Methoden kaum nachstehen. Sie lässt sich auch ohne weiteres auf andere poröse Stoffe anwenden.

Sichtbarmachen der Zuschlagkörner

Da sich die Zuschlagkörner im Betongefüge aufgrund ihrer anderen chemischen Zusammensetzung und Dichte im allgemeinen von der Zementmatrix unterscheiden, können diese im Tomogramm sichtbar gemacht werden. Je mehr sich der Absorptionskoeffizient von dem der Zementmatrix unterscheidet, um so besser ist ihr Bildkontrast und somit ihre Erkenntlichkeit. Dabei wurden bei den drei untersuchten Betonsorten Kieskörner mit Absorptionskoeffizienten zwischen 0,57 cm^{-1} und 0,85 cm^{-1} festgestellt (s. Bild 6, Normalbeton NB unten links). Schwierigkeiten ergeben sich dann, wenn gewisse Kieskörner denselben Absorptionskoeffizienten wie die Zementmatrix aufweisen.

Um die Zuschlagkörner gut sichtbar zu machen, wurden moderne Bildverarbeitungsmethoden ausprobiert. Dabei wird aus dem rohen Tomogramm ein neues ermittelt, bei dem die Körner besser erkennbar sind. Um diese noch besser zu erfassen, wurde zusätzlich ein *Segmentierungsverfahren* ausprobiert, wobei die *Phasengrenze Korn-Matrix durch weisse Ränder* gekennzeichnet wird. Alle diese Vorgänge werden selbständig vom Computer durchgeführt. Mit diesem Verfahren ist es noch möglich, Zuschlagstoffe mit einem minimalen Durchmesser von ungefähr 2 mm zu erfassen.

Beurteilung der Inhomogenitäten

Da die Computer-Tomographie ein zweidimensionales Abbild des Röntgenabsorptionskoeffizienten liefert, bietet sich die Möglichkeit an, Inhomogenitäten wie Hohlräume, schwache Stellen mit verminderter Porosität, grosse Luftporen usw. (Bild 6) qualitativ zu beurteilen. Ähnliche Möglichkeiten bietet eigentlich nur die Lichtmikroskopie, die aber den Nachteil hat, dass sie nicht zerstörungsfrei ist und im allgemeinen einer speziellen Präparation der Proben bedarf. Die dabei zu erstellenden Dünnschliffe und Anschliffe sind zeitraubend, und Artefakte sind nicht ausgeschlossen. Ein Tomogramm dagegen ermittelt ohne Präparation direkt eine Art «Dünnschliff» der Probe von der Dicke, die dem Durchmesser des Röntgenstrahls entspricht (etwa 1 mm).

Porenverteilung

Da das Auflösungsvermögen des Tomographen bestenfalls etwa 0,3 mm beträgt, lässt sich bis jetzt leider nur die *Porengrössenverteilung der grösseren Luftporen* im Beton sicher erfassen. Für die Beurteilung der *Frost-Tausalzbeständigkeit* ist jedoch der Wert des Abstandsfaktors von grosser Bedeutung. Der Abstandsfaktor soll für einen frost- und tausalzbeständigen Beton etwa 0,15 mm betragen. Dabei wäre es natürlich nützlich, Poren dieser Grössenordnung noch zuverlässig erfassen zu können. Beim Tomograph reicht das Auflösungsvermögen jedoch leider nicht mehr aus. Hier ist die Lichtmikroskopie eindeutig überlegen. Trotzdem könnten moderne Bildverarbeitungsmethoden helfen, anhand eines Tomogramms Aussagen (Korrelationen) zu Eigenschaften wie z. B. zur Frost-Tausalzbeständigkeit zu machen. Solche Untersuchungen sollen in Zukunft auch durchgeführt werden. Eine andere Möglichkeit könnte darin bestehen, spezielle Tomographen mit einer entsprechend höheren Auflösung zu entwickeln. Leider ist jedoch nicht zu erwarten, dass diese besser als etwa 0,1 mm sein könnte.

Zusammenfassung

Obwohl die Computer-Tomographie eine neue, noch wenig entwickelte Methode in der Materialwissenschaft, insbesondere im Baustoffsektor, ist, glauben wir, dass sie für Gefügeuntersuchungen am Beton gut geeignet ist. Die Art, wie der Röntgenabsorptionskoeffizient an verschiedenen Stellen der Probe quantitativ ermittelt werden kann, ist besonders gut an die Probleme, die sich mit einem *heterogenen* Material ergeben, angepasst. Die meisten anderen zerstörungsfreien Methoden erfassen das Material als Ganzes und ergeben dadurch naturgemäss meistens wenig Information über die innere Struktur. Die Stärke der Computer-Tomographie liegt also besonders in der *Verschiedenartigkeit* im Vergleich zu anderen Methoden. Durch die automatisierte Art und der quantitativen Erfassung der Messwerte mit ausgezeichneter Reproduzierbarkeit können subjektive Einflüsse dabei weitgehend ausgeschaltet werden. Ausserdem kann man die Computer-Tomographie als aussergewöhnlich *zeitsparend* im Vergleich zu anderen Methoden bezeichnen. Mit unseren Versuchen konnten bereits folgende Anwendungen erfolgreich durchgeführt werden:

- *Ermittlung der Gesamtporosität*, genauer der des *Zementmörtels*, insbesondere in Abhängigkeit des Abstandes von der Schalungsoberfläche.
- *Sichtbarmachen der grösseren Zuschlagkörner* sowie der grossen *Luftporen* im Betongefüge. Segmentation der Steine.
- Qualitative Beurteilung des Gefüges, insbesondere Inhomogenitäten wie z. B. Stellen mit erhöhter Porosität, Lunkern.

Wie die technologisch wichtigen Betoneigenschaften mit dem Absorptionskoeffizienten genau zusammenhängen, ist noch wenig untersucht. Hier bedarf es auf jeden Fall noch einiger Entwicklung der Methode. Eine besondere Schwierigkeit liegt darin, dass praktisch alle heute verwendeten kommerziellen Tomographen für medizinische Anwendungen konzipiert wurden. So arbeiten diese naturgemäss mit relativ weicher und schwacher Röntgenbestrahlung, um eine mögliche Schädigung des biologischen Gewebes infolge Strahlungseinwirkung zu verhindern. Der Beton sowie auch die meisten anderen Werkstoffe wären dagegen natürlich völlig unempfindlich. Ausserdem ist eine bessere Auflösung als etwa 0,5 mm in der Medizin in der Regel nicht notwendig. Daher wäre es nützlich, spezielle dem Prüfobjekt angepasste Tomographen zu konstruieren. Dazu müssten u. a. auch andere Strahlungsquellen sowie andere Detektoren verwendet werden [5].

*

Verdankung

Diese Arbeit ist im Rahmen eines vom schweizerischen Schulratspräsidenten, Prof. *M. Cosandey*, geförderten *interuniversitären Forschungsprojektes* «Gefüge und mechanische Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe» entstanden. Für die grosszügige Unterstützung und Benützung des Tomographen am *Institut für biomedizinische Technik der ETH und der Universität Zürich* möchten wir Prof. Dr. *M. Anliker*, Dr. *P. Rüegsegger* und ihren Mitarbeitern bestens danken. Prof. Dr. *O. Kübler* vom *Institut für*

Kommunikationstechnik der *ETH Zürich* verdanken wir wertvolle Diskussionen und Anregungen bezüglich der Auswertung der Bilddaten.

Adresse der Verfasser: *P.Schwander*, dipl. Physiker ETH, Prof. Dr. *A. Rösli*, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Literatur

[1] Zwischenbericht der 2. Untersuchungsphase des interuniversitären Forschungsprojektes: Gefüge und mechanische Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe 1981/82.

[2] *Reimers, P.*, et al (1980): «Beispiele für die Anwendung der Computer-Tomographie (CAT) in der zerstörungsfreien Materialprüfung». Materialprüfung 22

[3] *Barrett, H. H., Swindell, W.* (1977): «Analog Reconstruction Methods for Transaxial Tomography». Proc. IEEE, Vol. 65

[4] *Hermann, G. T.* (1980): Image Reconstructions from Projections». Academic Press

[5] *Morgan, I. L.* (1980): «Examination of Concrete by Computerized Tomography». ACI Journal, Proceedings V. 77

Ein Verfahren zur Berechnung der Entgleisungssicherheit von Schienenfahrzeugen – Teil II

Von Hans-Hermann Pribnow, Nussbaumen (AG)
(Teil I vgl. H. 3/84)

5 Vertikale Belastungen der Räder

5.1 Vertikale Belastungen der Drehgestellauflagen

Unter Drehgestellauflage werden alle Teile verstanden, über die Kräfte und Belastungen vom Fahrzeugkasten auf das Drehgestell übergehen. Die konstruktive Ausbildung der Drehgestellauflage ist für die Berechnung der Entgleisungssicherheit unerheblich. Wichtig sind die Angaben (vgl. Abschnitt 2.4.4)

h_h Höhe der Längsmitnahme über SO (Anlenkhöhe)
h_q Höhe der Quermitnahme über SO (Anlenkhöhe).

Als Basis für die Seitenabstützung wird der Abstand $2s$ der Radaufstandspunkte gewählt, um später eine direkte Umrechnung auf die Radlasten zu ermöglichen.

5.1.1 Statische Belastung der Drehgestellauflagen senkrecht zum Gleis

talseitige Auflagen

(63) $D_{10} = D_{20} = \frac{1}{2} \cdot G_{K3}\, a_b / e_z$

bergseitige Auflagen

(64) $D_{30} = D_{40} = \frac{1}{2} \cdot G_{K3}\, a_t / e_z$

Wert für G_{K3} aus Gleichung (12).

Diese Gleichungen gelten für Fahrzeugkästen mit symmetrischer Gewichtsverteilung um die Fahrzeuglängsachse. Ist dies nicht der Fall, so müssen die Werte von D_{10} bis D_{40} getrennt berechnet werden.

5.1.2 Änderung der vertikalen Belastungen aus dem Hangabtrieb

(65) $\Delta D_{11} = \Delta D_{21} = + H_{K1} (h_k - h_h) / 2 e_z$

(66) $\Delta D_{31} = \Delta D_{41} = - H_{K1} (h_k - h_h) / 2 e_z$

Wert für H_{K1} aus Gleichung (2).

5.1.3 Änderung der vertikalen Belastungen aus der Neigung des Fahrzeuges in Gleisquerrichtung

(67) $\Delta D_{12} = \Delta D_{32} = + H_{K2} (h_k - h_q) / 4 s$

(68) $\Delta D_{22} = \Delta D_{42} = - H_{K2} (h_k - h_q) / 4 s$

Wert für H_{K2} aus Gleichung (8).

Diese Gleichungen gelten, wenn die bogenäussere Schiene überhöht ist.

5.1.4 Änderung der vertikalen Belastungen aus der Trägheitskraft infolge Beschleunigung oder Verzögerung

(69) $\Delta D_{13} = \Delta D_{23} = G_K\, b\, (h_k - h_h) / 2 e_z$

(70) $\Delta D_{33} = \Delta D_{43} = G_K\, b\, (h_k - h_h) / 2 e_z$

Beschleunigungen und Vorzeichen

Fahrtrichtung	b nach Gl.	ΔD_{13}	ΔD_{33}
bergwärts beschleunigt	b_{Ab} (1a)	+	−
bergwärts verzögert	b_{Bb} (1d)	−	+
talwärts beschleunigt	b_{At} (1b)	−	+
talwärts verzögert	b_{Bt} (1c)	+	−

5.1.5 Änderung der vertikalen Belastungen durch die Fliehkraft

(71) $\Delta D_{14} = \Delta D_{34} = - F_K (h_k - h_q) / 4 s$

(72) $\Delta D_{24} = \Delta D_{44} = + F_K (h_k - h_q) / 4 s$

Wert für F_K aus Gleichung (14).

5.1.6 Änderung der vertikalen Belastungen durch Windkraft

(73) $\Delta D_{15} = \Delta D_{35} = - W_K (h_f - h_q) / 4 s$

(74) $\Delta D_{25} = \Delta D_{45} = + W_K (h_f - h_q) / 4 s$

Wert für W_K aus Gleichung (24a) bzw. (24b).

5.1.7 Änderung der vertikalen Belastungen durch die Kupplungskräfte

Diese Gleichungen sind nur gültig, wenn die Kupplungen am Fahrzeugkasten angelenkt sind. Sind die Kupplungen an den Drehgestellen angelenkt, so sind ΔD_{16} bis ΔD_{49} gleich Null zu setzen.

Änderung durch die Vertikalkomponente der bergseitigen Kupplungskraft

(75) $\Delta D_{16} = \Delta D_{26} = - P_{bv}\, a_{pb} / 2 e_z$

(76) $\Delta D_{36} = \Delta D_{46} = + P_{bv} (a_{pb} + e_z) / 2 e_z$

Wert für P_{bv} aus Gleichung (21).

Änderung durch die Vertikalkomponente der talseitigen Kupplungskraft

(77) $\Delta D_{17} = \Delta D_{27} = + P_{tv} (a_{pt} + e_z) / 2 e_z$

(78) $\Delta D_{37} = \Delta D_{47} = - P_{tv}\, a_{pt} / 2 e_z$

Wert für P_{tv} aus Gleichung (20).

Änderung durch die horizontalen Komponenten der Kupplungskraft in Fahrzeuglängsachse

(79) $\Delta D_{18} = \Delta D_{28} = - (P_b - P_t) (h_p - h_h) / 2 e_z$

(80) $\Delta D_{38} = \Delta D_{48} = + (P_b - P_t) (h_p - h_h) / 2 e_z$

Werte für P_b und P_t aus Gleichungen (16a) bis (17f).

Änderung durch die horizontalen Komponenten der Kupplungskräfte in Fahrzeugquerrichtung

(81) $\Delta D_{19} = \Delta D_{39} = - (P_{bq} + P_{tq}) (h_p - h_q) / 4 s$

(82) $\Delta D_{29} = \Delta D_{49} = + (P_{bq} + P_{tq}) (h_p - h_q) / 4 s$