

Zerstörungsfreie und geophysikalische Bewertungs- und Kontrollmethoden

Xavier DEROBERT

Ifsttar, route de Bouaye, CS4, F-44344 Bouguenais, France

Zusammenfassung.

Zerstörungsfreie (ND) Erkundungstechniken, seien es nun zerstörungsfreie oder geophysikalische Bewertungsmethoden, werden üblicherweise im Bau- und Transportwesen, im Bereich der Energietechnik oder der Stadtentwicklung angewandt. Während sich jedoch im Laufe der letzten Jahrzehnte das Interesse auf interne geometrische Informationen zu der untersuchten Umgebung richtete, konzentrieren sich jüngere Forschungen auf Informationen, die mit der Art und dem Zustand dieser Umgebung verbunden sind, um so dem Begriff der zerstörungsfreien Bewertung näher zu kommen. Die gegenwärtig laufenden Studien versuchen, die aus zerstörungsfreien Messungen abgeleiteten Werte in statistische, mit Lebensdauermodellen verknüpfte Ansätze zu integrieren.



Projet cofinancé par le Fonds européen de développement régional dans
du programme INTERREG IVA Grande Région
L'Union européenne investit dans votre avenir.

Gefördert durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung im
des Programms INTERREG IVA Großregion
Die Europäische Union investiert in Ihre Zukunft.



1. Einleitung

Zerstörungsfreie (ND) Erkundungstechniken werden üblicherweise im Bau-, Transport- und Energiewesen oder der Stadtentwicklung angewandt. Je nach Gemeinschaft und untersuchtem Bereich spricht man dabei von zerstörungsfreien Bewertungs- und Kontrollmethoden bei der Untersuchung von Strukturen und Infrastrukturen oder von geophysikalischen Methoden bei der Untersuchung des Untergrunds (oder des oberflächennahen Grundes bei Tiefbauanwendungen).

Diese Technologie nutzt indirekte physikalische Methoden wie die Ausbreitung von Wellen oder die Feldstreuung, um interne Informationen zu dem untersuchten Bereich zu erhalten [1-2]. Im Laufe der letzten Jahrzehnte konzentrierten sich die entwickelten Techniken aufgrund der zu dieser Zeit bekannten Technologien und Möglichkeiten in der EDV hauptsächlich auf die Suche nach geometrischen Informationen. Neben der Erstellung von Innenschnitten (oder der Erzeugung von qualitativen Bildern) sind hierbei auch Radar-Profilbilder, die seismische oder Schalltomographie, elektrische Schaltungspulte oder über Kartographien erstellte Karten zu elektrischem Widerstand, gravimetrischen Messungen oder Infrarotbildern zu erwähnen.

Obwohl bei diesen Techniken auch eine Entwicklung hin zu präziseren, schnelleren oder leichteren Geräten festzustellen war, tendierten jüngere Forschungen zu Informationen über den Zustand des untersuchten Bereichs und demnach zu dessen Bewertung. Man spricht dabei also über die Begrifflichkeiten quantitativer Bilder (Tomographien, Pulte, Schnitte).

Gegenwärtig laufende Arbeiten sind ausgerichtet auf die Beziehungen, die zwischen den aus zerstörungsfreien Messungen abgeleiteten Werten und den Zustands- oder Zusammensetzungsindikatoren des untersuchten Bereichs bestehen können, damit erstere nützlich sein und demnach als Eingangsdaten für Lebensdauermodelle von Bauwerken berücksichtigt werden können. Dies schließt Komplementaritätsansätze, die Fusion von ND-Daten und statistische Ansätze ein, die aktuelle Forschungsleitlinien sind.

Die Bilder, die im nachfolgenden Text zu Illustrationszwecken eingefügt sind, stammen ausnahmslos aus Untersuchungen, die im Laufe der letzten Jahre vom « Laboratoire Auscultation et Imagerie » (Assessment and Imaging Laboratory) durchgeführt wurden.

2. Qualitative Bilderzeugung

Eine der am häufigsten angewandten Techniken, um indirekt geometrische Informationen zu liefern, ist die Radartechnik (Ground-penetrating radar, GPR). Wird das System bewegt, zeichnet es die Zeit auf, die für die Ausbreitung kurzer, elektromagnetischer Impulse benötigt wird, die auf die verschiedenen Grenzflächen, auf die sie treffen, reflektiert werden. Dies äußert sich als Erfassung von Zeitstößen, die einem deformierten Bild des Vertikalschnitts des untersuchten Bereichs entsprechen (Abb. 1). In der Tat zeigt sich anhand des in Abb. 1a dargestellten Beispiels, dass die Einheit der Vertikalachse eine Zeiteinheit ist (Nanosekunden für die Radartechnik). Es muss daher eine Kalibrierung vorgenommen werden, um die Verbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen in den untersuchten Bereichen zu ermitteln, um wiederum diese Zeitprofile in Sektionen umwandeln zu können.

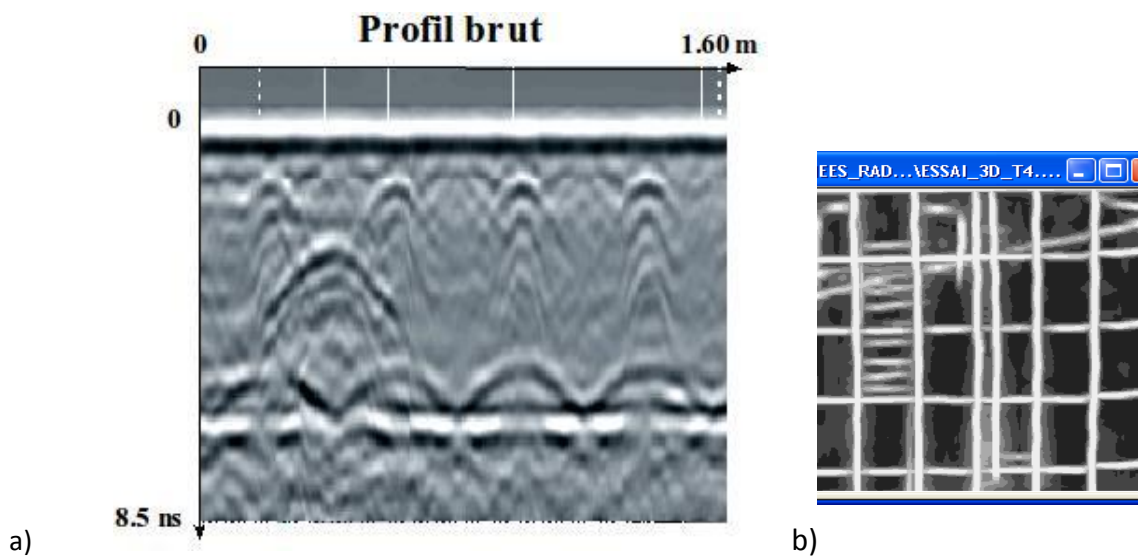


Abbildung 1: a) Radarprofil (erstellt mit 1.5 GHz) für den Kern eines Spannbetonträgers. b) Radarkartographie über ein vorgespanntes Bahnsteigelement (Quelle: Cerema – DLR SB).

Ausgehend von mehreren, linearen Erfassungszeilen kann man Kartographien rekonstruieren, die aus einem 3D-Datensatz hervorgehen – so, wie es bei der Radartechnik der Fall ist (siehe Abbildung 1b, die das Bild von Bewehrungen – passiver und aktiver Armierungen – eines Bahnsteigträgerelements zeigt, oder die aus einer Integralmessung aufgrund der räumlichen Position (Koordinaten) stammen.

Für letzteren Fall kann man als Beispiel elektromagnetische (EM) Niederfrequenzmessungen (NF – einige Hundert Hertz), die bei geophysikalischen Anwendungen eingesetzt werden. Das allgemeine Prinzip beruht dabei auf der Emission eines anhaltenden EM-Signals und dies mit Hilfe einer Spule und der Messung eines EM-Feldes, das durch die Art des Umgebungsmilieus hervorgerufen wird. Diese Messung, die ein plurimetrisches Bodenvolumen um den Messpunkt herum miteinbezieht, liefert Informationen hinsichtlich des offenbaren, elektrischen Widerstands. Dieser Ansatz bleibt qualitativer Art, denn der gemessene Parameter steht in keinem direkten Zusammenhang mit der dielektrischen Eigenart des nahen Unterbodens. Das in Abbildung 2 aufgeführte Beispiel zeigt eine EM-NF-Kartographie für die Suche nach Hohlräumen in der Normandie.

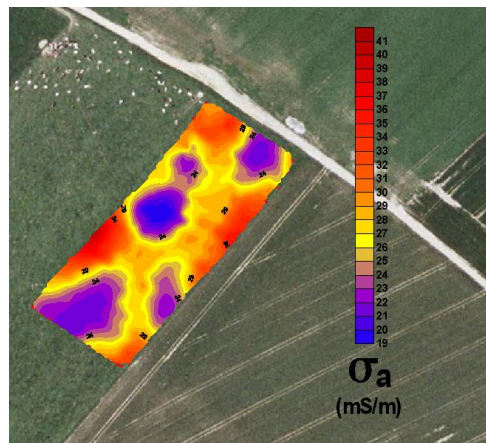


Abbildung 2: EM-NF-Kartographie für die Suche nach Hohlräumen in der Normandie (FR) (Quelle: Cerema - DLRR)

Man könnte noch andere, komplexere Ansätze zitieren, wie die tomographischen Techniken, die eine Sektion eines untersuchten Bereichs auf numerische Art durch Dateninversion rekonstruieren. Dazu braucht es Multisensoren, die unter Einhaltung verschiedener Abstände so positioniert werden, dass die verschiedenen, untersuchten grundlegenden Abschnitte – oder Volumen – unterschiedliche Messungen nach sich ziehen. Abbildung 3 zeigt ein Kartographierungsbeispiel, basierend auf einer seismisch-tomographischen Rekonstruktion, die auf einem Steinbruchpfeiler durchgeführt wurde, der einer Seitenbelastung ausgesetzt war (schwarzer Pfeil). Die Messungen wurden ausgehend von drei Bohrungen ausgeführt, wobei die Kreis- und Dreieckslinien die Sender- und Empfängerpositionen darstellen. Diese Kartographie zeigt diejenigen Bereiche auf, in denen die größten Zeitvariationen bei der Ausbreitung der seismischen Wellen vorlagen, wobei die Messungen offen, unter Komprimierung des Zylinders durchgeführt wurden, der die seitliche Belastung simulierte. Eine erste Interpretation besteht darin, die größten Variationen hinsichtlich der Geschwindigkeitszunahme in Belastungsvariationen zu übersetzen. Auf diese Weise gibt diese Kartographie die Tragweite der Variationen der Maximalbelastungen wieder, denen der Pfeiler ausgesetzt ist.

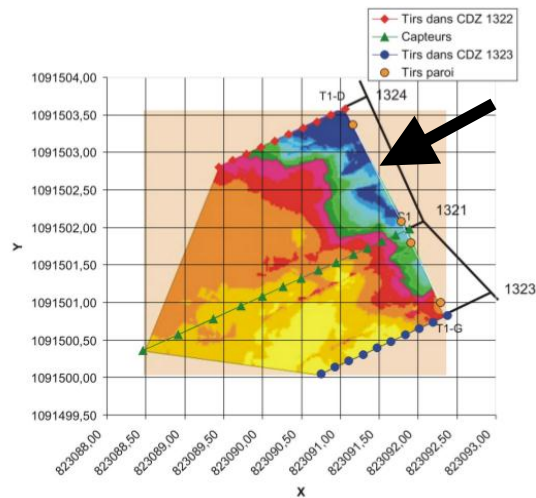


Abbildung 3 : Seismische Tomographie (horizontaler Querschnitt) eines Steinbruchpfeilers, die eine Geschwindigkeitsvariationskarte unter der Einwirkung einer Seitenbelastung erzeugt (schwarzer Pfeil).

3. Quantitative Bilderzeugung

Die Techniken der quantitativen Bilderzeugung haben ihrerseits zum Gegenstand physikalische Charakteristika eines Gebiets aufzuzeigen, wie z.B.: die elektrische Permittivität oder den elektrischen Widerstand im Falle elektromagnetischer Messungen, das Young-Modul oder die Verbreitungsgeschwindigkeit für mechanische Wellen (seismischer Art, Schall- oder Ultraschall). Diese Informationen, die man durch Berechnung von Messungsinversionen erlangt, gelten als von der Messtechnik unabhängige Anhaltspunkte für die Charakterisierung des Gebiets. Diese starke Annahme muss man nuancieren, denn die Genauigkeit dieser Informationen hängt selbstverständlich von der räumlichen Dichte der Messungen, der Genauigkeit von deren Lokalisierung oder der Genauigkeit der Messungen selbst ab. Darüber hinaus können diese Rekonstruktionen auch einen eindimensionalen Charakter haben, der im Allgemeinen von der Tiefe abhängig ist, wie im Beispiel von Abbildung 4, wo man die Dicken und mechanischen Charakteristika (seismische Geschwindigkeit) der Sohle eines Tunnels und dessen unmittelbarer Umgebung untersucht.

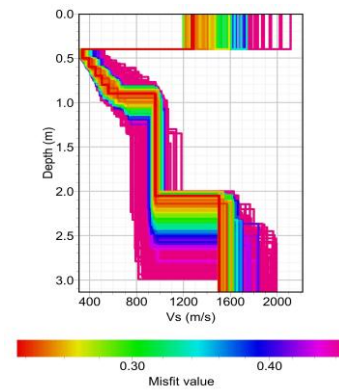
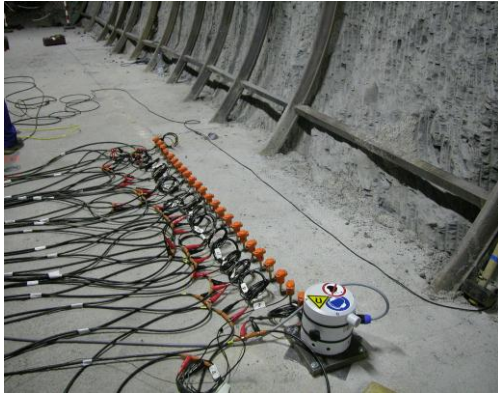


Abbildung 4 : a) Versuchsaufbau einer Reihe seismischer Sensoren im Tunnel. b) Rekonstruktion von Vertikalprofilen seismischer Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Tiefe.

In diesem Beispiel weist man durch die Erstellung mehrerer Profile (Abb. 4) das Vorliegen zweier Materialschichten oberhalb des Substrats (Unterboden) nach, deren Dicken und mittlere seismische Geschwindigkeiten bekannt sind. Da man weiß, dass das Material einen umso größeren, mechanischen Widerstand aufweist, je höher die seismische Geschwindigkeit ist, kann man auf Grundlage dieser Messungen erste Interpretationen treffen.

4. Charakterisierung von Materialien

Obwohl bei diesen Techniken auch eine Entwicklung hin zu präziseren, schnelleren oder leichteren Geräten festzustellen war, tendierten jüngere Forschungen zu Informationen über den Zustand des untersuchten Bereichs und demnach zu dessen Bewertung.

Gegenwärtig laufende Arbeiten sind ausgerichtet auf die Beziehungen, die zwischen den aus zerstörungsfreien Messungen abgeleiteten Werten und den Zustandsindikatoren oder der Zusammensetzung des Bereichs bestehen können, damit erstere nützlich sein und demnach als Eingangsdaten für Lebensdauermodelle von Bauwerken berücksichtigt werden können [3].

Bei dieser Vorgehensweise kann man, ausgehend von Labormessungen zu homogenisierten Mischungen, die mit Hilfe elektromagnetischer, Schall- oder elektrischer Zellen kontrolliert werden durch die Veränderung eines der Parameter (wie Wassergehalt, Porosität, Zementgehalt bei hydraulischen Betons oder die Art der Zuschlagstoffe) mit Hilfe der zerstörungsfreien Techniken Regressionskurven (master curves) erhalten. Nimmt man zum Beispiel die Sensibilitätsstudie einer zerstörungsfreien Technik zu Wassergehalt und Porosität, erhält man (für den Fall linearer Beziehungen) eine Gleichung des Typs:

$$\text{Mes(NDT)} = a.W + b.\text{Poro} + c \quad (1)$$

In diesem Bereich (W, Poro) finden sich die anderen Zustands- oder Zusammensetzungsparameter in dem Term c wieder. Auf diese Weise ist jede zerstörungsfreie Technik gemäß der Sensibilität des Gemisches in wässrigem oder porösem Zustand durch eine eigene Dreiergruppe (Triplet) (a,b,c) darstellbar. Bei einer zerstörungsfreien Untersuchung dieses Gemisches in unbekanntem, wässrigem oder porösen Zuständen mittels mehrerer Techniken (EM, elektrisch oder Ultraschall), kann man auf eine Einschätzung dieses Zustandes zurückgreifen, indem man die aus der Gleichung (1) und den zerstörungsfreien (ND) Messungen erhaltenen Kurven miteinander abgleicht. Abbildung 6 liefert ein Versuchsbeispiel für ein homogenes Betongemisch, bei dem der grüne Punkt dessen reellem Zustand entspricht und die Geraden zu einem sehr nahe daran liegenden Wertepaar zusammenlaufen (W, SR – Sättigungsgrad). Dieses Beispiel veranschaulicht das Potenzial der zerstörungsfreien Techniken, wenn man auch weiß, dass noch zahlreiche wissenschaftliche Sperren bestehen, die gegenwärtig laufende Studien zu beheben versuchen – sei es mittels Gradientenuntersuchungen, der Fusion von ND-Daten oder statistischer Ansätze in Abhängigkeit von der räumlichen Veränderbarkeit des untersuchten Stoffes. So möchte man bald die aus zerstörungsfreien Messungen abgeleiteten Werte mit den Zustands- oder Zusammensetzungsindikatoren des Bereichs verknüpfen, damit erstere als Eingangsdaten in Lebensdauermodellen von Bauwerken berücksichtigt werden können.

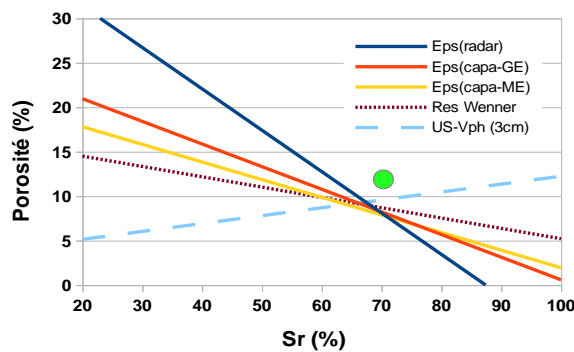


Abbildung 5 : Charakterisierung einer Betonmischung durch Koppelung mehrerer, zerstörungsfreier (ND) Techniken (Radar, Elektrik, Kapazitive Technik, Ultraschall).

Referenzen

- [1] Reynolds J.M. (1997), "An introduction to applied and environmental geophysics", éd. Wiley & Sons, pp 681-749.
- [2] McCann DM, Forde MC. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT&E Int 2001;34(2):71–84.
- [3] Balayssac J.P., Laurens S., Arliguie G., Breyse D., Garnier V., Dérobert X., Piwakowski B. (2012), "Description of the general outlines of SENSO project: Quality assessment and limits of different NDT methods", Journ. Const. & Build. Mat., Vol. 35, pp. 131-138.