

Higher Reliability of Ultrasonic Testing of Concrete Innovative Automatic Wave Picking Method

Höhere Zuverlässigkeit von Ultraschalluntersuchungen an Betonwaren Innovatives automatisches Verfahren zur Signalerfassung

○ The objective of the study carried out was to improve the reliability of in-situ ultrasonic testing of concrete using algorithms that automatically determine the arrival time of ultrasonic waves to an acceptable degree of accuracy. The exact determination of the arrival time is of fundamental importance to permit the expansion in the application of this testing technology and to provide the option to perform more advanced signal processing, including energy measurement or the analysis of the spectrum of the waveform frequency using the Fourier, Gabor and Wavelet theories.

○ Ziel der durchgeführten Studie ist die Verbesserung der Zuverlässigkeit der Ultraschallprüfung von Betonwaren in situ durch Anwendung von Algorithmen, mit denen die Ankunftszeit des Signals automatisch und mit hinreichendem Präzisionsgrad bestimmt werden kann. Die genaue Ermittlung der Signaleingangszeit ist von grundlegender Bedeutung für die Erweiterung des Anwendungsspektrums dieses Untersuchungsverfahrens und Eröffnung der Möglichkeit einer technisch fortgeschritteneren Signalverarbeitung mit Energiemessung oder Analyse des Spektrums der Wellenfrequenzen unter Anwendung der Fourier-, Gabor- und Wavelet-Theorien.

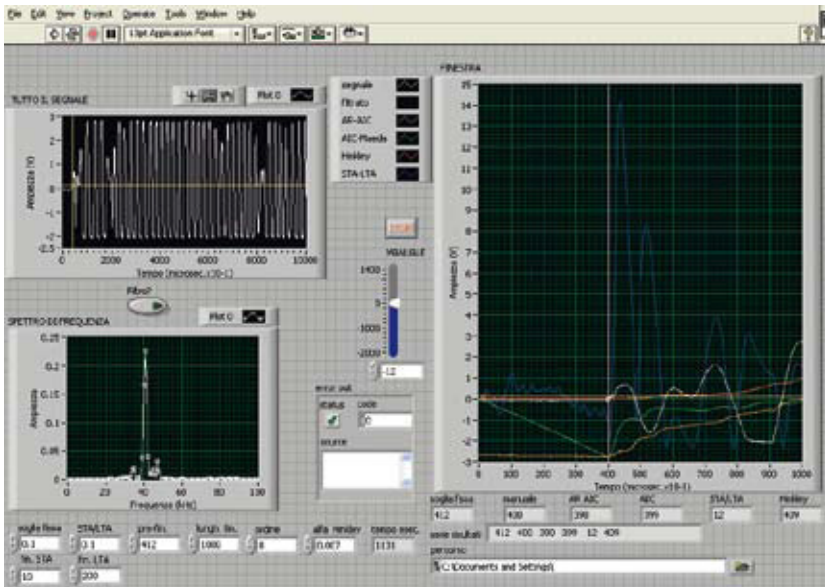


Fig. 1 Main window of the software developed.

Abb. 1 Hauptfenster der entwickelten Software.

The concepts of reliability and durability are becoming increasingly important in the civil engineering sector. Over the past few years, the awareness of the need for restoration and conservation of infrastructural facilities and industrial and civil buildings has favored the development and use of an ever-increasing number of methods for diagnosis, analysis and structural restoration.

The need for conservation may have different roots such as the age of the existing building stock, the degrading of building materials over time, seismic damage, differential settlement of foundations, design errors, or the desire to maintain existing buildings not only for economic reasons but above all because of their architectural and cultural merit.

The need to be able to use the most efficient analytical methods is of great importance so as to collect the greatest amount of information possible on the structure to be maintained so that the correct structural intervention can be designed.

In fact, this analysis must precede any decision regarding the structural intervention in order to reveal any

Im Bauingenieurwesen nimmt die Bedeutung der Konzepte der Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit immer mehr zu. In den letzten Jahren hat das Bewusstsein der Notwendigkeit der Wiederherstellung und Erhaltung von Einrichtungen der Infrastruktur sowie von Industrie- und Ingenieurbauten die Entwicklung und Anwendung immer zahlreicher Diagnose- und Analysemethoden sowie Verfahren der konstruktiven Wiederherstellung gefördert.

Das Bedürfnis der Erhaltung und Bewahrung kann dabei unterschiedliche Ausgangspunkte haben, wie z. B. das Alter des Baubestands, die Abnutzung von Baustoffen im zeitlichen Verlauf, durch Erdbeben verursachte Schäden, unterschiedliche Setzungen von Fundamenten, Planungsfehler oder auch der Wunsch, die vorhandene Baustanz nicht nur aus wirtschaftlichen, sondern auch aus architektonischen und kulturellen Beweggründen zu erhalten.

Dabei ist es von großer Bedeutung, über effizienteste Untersuchungsmethoden zu verfügen, um den größtmöglichen Umfang an Daten zum Bauwerk zu erheben, das erhalten werden soll, so dass der am besten geeignete konstruktive Eingriff geplant werden kann.

Die entsprechende Analyse muss dabei jeder Entscheidung in Bezug auf eventuelle konstruktive Eingriffe vorausgehen, um konstruktive Beschränkungen und ihre Ursachen zu ermitteln, bevor unangemessene Arbeiten durchgeführt werden, die sich später als nachteilig oder gar schädlich erweisen könnten.

Die weite Verbreitung zerstörungsfreier Prüfverfahren hat zu einer regen Forschungstätigkeit in diesem Bereich geführt: Es wurden neue Untersuchungsverfahren und Technologien vorgeschlagen, wenn auch noch nicht in jedem Fall eingeführt. Zudem besteht die Möglichkeit, aus anderen Branchen stammende Technologien zu diesem Zweck zu übernehmen.

Zahlreiche zerstörungsfreie Prüfungen und Verfahren sind in internationalen Normen geregelt, die ihren Anwendungsbereich und die Art der Anwendung festlegen (zum Beispiel der Schmidt-Hammer oder der Abzieh- und Ausziehversuch), andere hingegen sind noch nicht genormt [1].

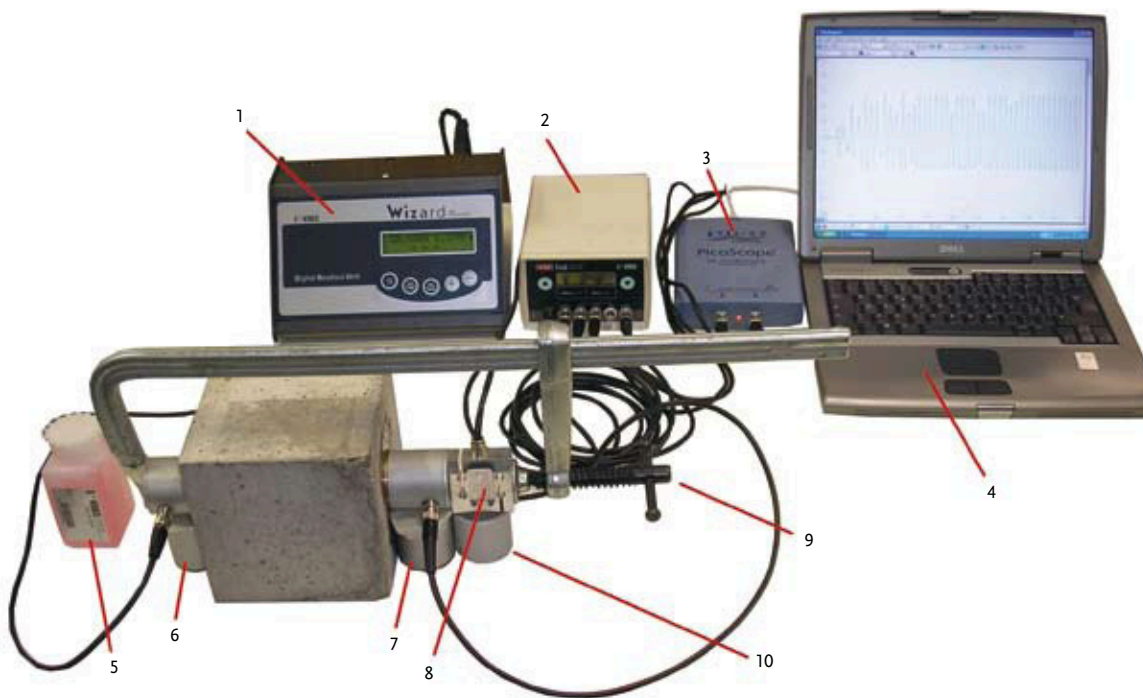


Fig. 2 Test setup.
Abb. 2 Versuchsaufbau.

- 1 digital readout unit/
digitale Ausleseinheit
- 2 UPV tester/
Ultraschall-Prüfgerät
- 3 digital oscilloscope/
Digitaloszilloskop
- 4 laptop/Laptop
- 5 contact paste/
Kontaktpaste
- 6 54 kHz transmitter/
Sender 54 kHz
- 7 54 kHz receiver/
Empfänger 54 kHz
- 8 load cell/Kraftmessdose
- 9 clamp/Klemme
- 10 distance pieces/
Distanzstücke

existing structural restrictions and their reasons before proceeding with inappropriate actions that may prove detrimental or, worse still, damaging.

The widespread use of non-destructive testing has led to a lot of research in this sector: new test methods and technologies have been proposed even if not yet implemented, and there is the possibility to use technologies from other sectors for this purpose.

Many non-destructive tests and methods are governed by international standards that define their field and method of use (e.g. concrete test hammer, pull-off and pull-out tests) whereas others continue to be non-standardized [1].

Fixed threshold method

The most intuitive and simple method for the determination of the arrival time uses a fixed threshold in amplitude. Typically, this threshold value is fixed to 200-300 mV for signals of a maximum amplitude of 10 V. When the signal value exceeds the threshold, it is taken as the arrival time. The method works relatively well for low noise disturbed signals of a high amplitude. However, if there is a discrete noise level and the signal is attenuated, this method is not reliable as it can result in errors of up to 30% compared to a visual determination by an expert operator.

The threshold value can be set manually or automatically.

The automatic setting can be shifted from zero to up to five times the standard deviation σ :

$$\text{Threshold} = 5 \cdot \sigma = 5 \cdot [(\sum y_i - \text{average})^2 / (N-1)]^{1/2}$$

A linear interpolation can be used to determine the magnitude to which the threshold has been exceeded to a greater resolution.

1 and 2 designate the two consecutive points prior to and after the threshold has been exceeded:

$$\text{Arrival time} = T1 + \Delta t \cdot (V_{\text{threshold}} - V1) / (V2 - V1)$$

where Δt is the sampling range according to the requested accuracy: 5 μs for 0.1 μs accuracy according to EN 12504-4.

STA/LTA method

A more dynamic approach is defined by the STA/LTA (Short Term Average, Long Term Average) method pro-

Methode des festen Schwellenwerts

Das einfachste und intuitivste Verfahren zur Ermittlung der Ankunftszeit des Signals betrifft die Anwendung eines festen Amplituden-Schwellenwertes. Typischerweise beträgt der festgesetzte Wert etwa 200 bis 300 mV für Signale mit einer maximalen Amplitude von 10 V. Überschreitet das Signal diesen Wert, gilt dieser als Ankunftszeit. Diese Methode funktioniert bei kaum durch Rauschen gestörten Signalen und großen Amplituden relativ gut, jedoch ist das Verfahren ab einem bestimmten Rauschpegel und bei abgeschwächtem Signal nicht zuverlässig, da es im Vergleich zu einer visuellen Bestimmung durch einen erfahrenen Techniker zu einer Abweichung von bis zu 30 % führen kann.

Der Schwellenwert kann manuell oder automatisch eingestellt werden.

Die automatische Einstellung ist von Null bis auf das Fünffache der Standardabweichung σ einstellbar:

$$\text{Schwellenwert} = 5 \cdot \sigma = 5 \cdot [(\sum y_i - \text{Durchschnitt})^2 / (N-1)]^{1/2}$$

Zur Darstellung der Überschreitung des Schwellenwertes in höherer Auflösung kann eine lineare Interpolation eingesetzt werden.

1 und 2 bezeichnen die zwei aufeinanderfolgenden Punkte vor und nach Überschreitung des Schwellenwertes:

$$\text{Ankunftszeit} = T1 + \Delta t \cdot (V_{\text{Schwellenwert}} - V1) / (V2 - V1)$$

Hierbei ist Δt die Abtastauflösung gemäß der erforderlichen Genauigkeit: 5 μs für eine Genauigkeit von 0,1 μs gemäß EN 12504-4.

Methode STA/LTA

Ein dynamischerer Ansatz ist die STA/LTA (STA: Short Term Average, LTA: Long Term Average) genannte Methode nach Baer und Kradolfer [2]. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um einen veränderlichen Durchschnittswert, wobei STA ein kurzes und LTA ein längeres Zeitfenster berücksichtigt. Das Verhältnis STA/LTA muss über dem festgelegten Schwellenwert liegen.

$$R = \frac{S_{STA}}{S_{LTA}} = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)/N}{\sum_{j=1}^M y(j)/M}$$

Fig. 3 Wave speed (m/s) on the y-axis vs contact pressure (MPa) on the x-axis for the automatic picks.

Abb. 3 Wellengeschwindigkeit auf der y-Achse vs. Anpressdruck (MPa) auf der x-Achse für die automatische Erfassung.

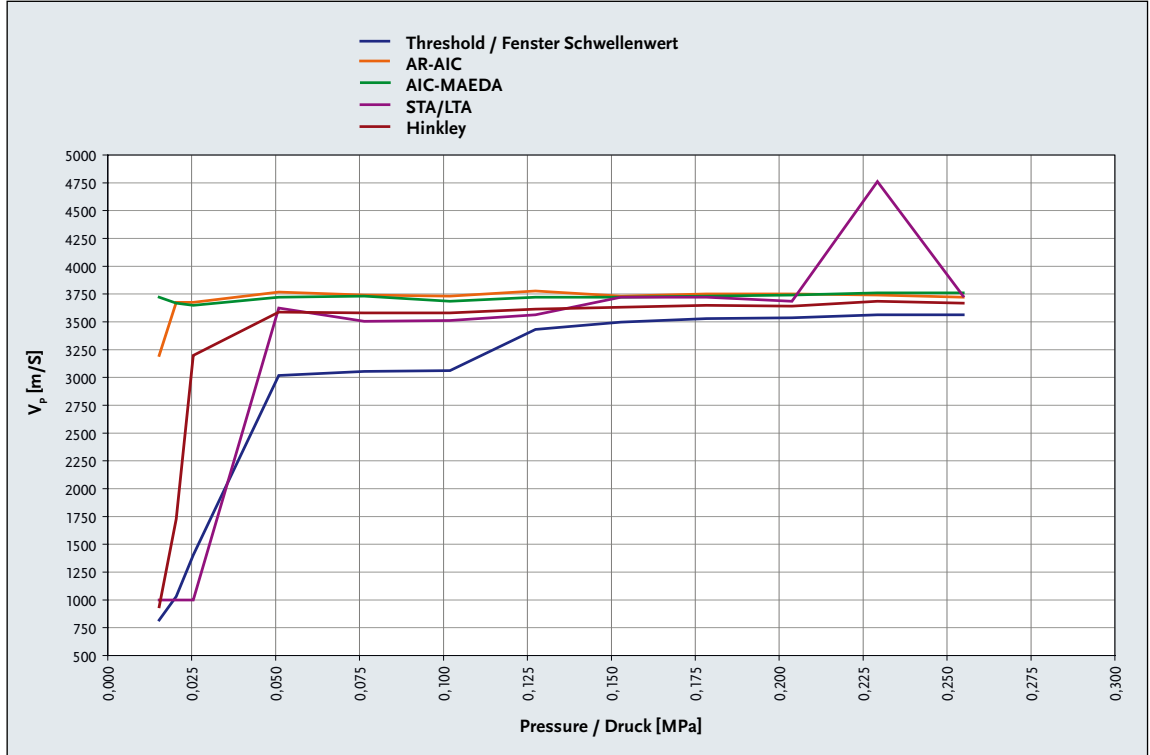


Table 1 P-wave speed with contact paste. 3,750 m/s manual pick.

Tabelle 1 P-Wellengeschwindigkeit mit Kontaktpaste. 3750 m/s manuelle Messung.

Force (N)	Pressure (MPa)	Threshold Vp (m/s)	AR-AIC Vp (m/s)	AIC - Maeda Vp (m/s)	STA/LTA Vp (m/s)	Hinkley Vp (m/s)
Kraft (N)	Druck (MPa)	Fester Schwellenwert Vp (m/s)	AR-AIC Vp (m/s)	AIC - Maeda Vp (m/s)	STA/LTA Vp (m/s)	Hinkley Vp (m/s)
30	0,015	818	3198	3722	1000	938
40	0,020	1031	3676	3667	1000	1732
50	0,025	1403	3676	3650	1000	3198
100	0,050	3018	3769	3722	3623	3589
150	0,075	3055	3741	3731	3505	3580
200	0,100	3061	3731	3686	3513	3580
250	0,125	3432	3778	3722	3563	3614
300	0,150	3497	3731	3722	3722	3632
350	0,175	3529	3750	3731	3722	3650
400	0,200	3538	3750	3741	3686	3641
450	0,225	3563	3741	3759	4762	3686
500	0,250	3563	3722	3759	3731	3667

Threshold	AR-AIC	AIC - Maeda	STA/LTA	Hinkley
Fester Schwellenwert	AR-AIC	AIC - Maeda	STA/LTA	Hinkley
78.18	14.71	0.75	73.33	75.00
72.51	1.96	2.25	73.33	53.92
62.58	1.96	2.75	73.33	14.71
19.52	0.50	0.75	3.38	4.31
18.53	0.25	0.50	6.54	4.53
18.37	0.50	1.75	6.32	4.53
8.47	0.76	0.75	4.99	3.61
6.76	0.50	0.75	0.74	3.15
5.88	0.00	0.50	0.74	2.68
5.66	0.00	0.25	1.72	2.91
4.99	0.25	0.25	26.98	1.72
4.99	0.74	0.25	0.50	2.20

posed by Baer and Kradolfer [2], which basically represents a moving average in which the STA term relates to a short time window whereas LTA considers a wider time window. The STA/LTA ratio must be greater than the threshold value.

$$R = \frac{S_{STA}}{S_{LTA}} = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)/N}{\sum_{j=1}^N y(j)/M}$$

Hinkley criterion

A third algorithm has been proposed by Grosse [3] and is based on the Hinkley criterion. The signal energy content S_i is calculated based on the sum of the squares for all points i of the R_k series corrected using a negative trend δ .

$$S'_i = S'_i - \delta \cdot i = \sum_{k=0}^i R_k^2 - i \cdot \delta$$

$$\delta = \frac{S_N}{\alpha \cdot N}$$

where N is the signal length, S_N is the total energy of the signal.

Table 2 Differences (%) of the wave speed detected via automatic picks vs manual picks. 3,750 m/s manual pick.

Tabelle 2 Abweichungen (%) der Wellengeschwindigkeit, ermittelt im Vergleich zwischen automatischer und manueller Messung. 3750 m/s manuelle Messung.

Hinkley-Kriterium

Ein dritter Algorithmus wurde von Grosse [3] vorgeschlagen und beruht auf dem Hinkley-Kriterium: Der Energiegehalt des Signals S_i wird ausgehend von der Summe der Quadrate aller Punkte i der Reihe R_k berechnet, korrigiert durch einen negativen Trend δ .

$$S'_i = S'_i - \delta \cdot i = \sum_{k=0}^i R_k^2 - i \cdot \delta$$

$$\delta = \frac{S_N}{\alpha \cdot N}$$

wobei N die Länge des Signals und S_N die Gesamtenergie des Signals ist.

Die Einführung eines negativen Trends modifiziert die partielle Funktion der Energie, so dass die Ankunftszeit nun vom Minimum der Funktion dargestellt wird.

Der Faktor α wird eingeführt, um eine systematische Verzögerung des Minimums der Energiefunktion zu re-

The introduction of a negative trend modifies the partial function of energy so that the arrival time is now represented by the minimum of the function.

The factor α is introduced to reduce a systematic delay of the minimum of the energy function derived from the introduction of the negative trend.

Auto Regressive Akaike Information Criterion

The Auto Regressive Akaike Information Criterion (AR-AIC) [4] is based on the entropy concept and provides a criterion to evaluate the models that describe the reality: the general rule is to prefer the models with a lower AIC value.

The autoregressive function provides reliable results only if applied to the investigated window containing the arrival time. It is thus important to select the relevant window once the waveform has been acquired.

The algorithm is based on the forecast of a sample based on a linear combination for precedent points equal to the grade of the autoregressive functions. The signal is divided into two points with a mobile pivot. On the extremity parts (start and end) the parameters of the autoregressive function are located, the first related to the noise, the second describing the pure signal. For each position of the pivot point, the standard deviation is calculated between the AR function and the acquired points, looking for the minimum of the standard deviation.

Given the waveform in the time domain, the Akaike algorithm assumes an autoregressive function defined as:

$$x_t = \sum_{m=1}^M a_m x_{t-m} + e_t^i$$

where

$t = 1, \dots, M$ for the range number 1

$t = N-M+1, \dots, N$ for the range number 1

e_t^i is the noise (Gauss variable)

$a_m^i = (1, \dots, M)$: autoregressive coefficients.

The Auto Regressive AR-AIC function divides the waveform into two parts: a deterministic and a non-deterministic portion, i.e. the noise that is assumed to have a Gauss distribution.

Akaike Information Criterion-Maeda

Maeda [5] proposes another method, different from the Auto Regressive approach, which is termed Akaike Information Criterion-Maeda (AIC-Maeda), where the AIC function is obtained directly from the waveform rather than through the autoregressive coefficients. The AIC function can thus be calculated directly, and the order of the AR model becomes superfluous. It is evident for the benefit in terms of computing power that this method does require the determination of a time window around the arrival time.

The window is divided into two parts from a pivot point between a maximum and a minimum of the waveform.

Therefore, if p is defined as the last value of the first part (the samples start from $i = 0$), it should give results of $3 \leq p \leq N-5$. For each position of p in the indicated range (thus, for $N-7$ times), a parameter is calculated as follows:

$$AIC = (p+1) \cdot \ln(\text{std. deviation 1}) + (N-p-1) \cdot \ln(\text{std. deviation 2})$$

duzieren, die durch die Einführung des negativen Trends entsteht.

Autoregressive Akaike-Methode

Die autoregressive AR-AIC-Methode (Autoregressive Akaike Information Criterion) [4] beruht auf dem Konzept der Entropie und bietet ein Verfahren zur Evaluierung der Modelle, die die Realität beschreiben: In der Regel werden die Modelle mit dem niedrigeren AIC-Wert vorgezogen.

Die autoregressive Funktion liefert nur dann zuverlässige Resultate, wenn sie auf das untersuchte Fenster angewendet wird, das den Ankunftszeitpunkt enthält. Daher ist es von grundlegender Bedeutung, dass dieses Fenster bestimmt wird, sobald die Welle erfasst worden ist.

Der Algorithmus beruht auf der Prognose für eine Probe, ausgehend von einer linearen Kombination einer Anzahl vorausgegangener Punkte, die dem Grad der Autoregressionsfunktionen entspricht. Das Signal ist in zwei Punkte unterteilt, mit einem veränderlichen Drehpunkt. An den jeweiligen Extrempunkten (Anfang und Ende) befinden sich die Parameter der beiden autoregressiven Funktionen, wobei sich der erste auf das Rauschen bezieht und der zweite das eigentliche Signal beschreibt. Für jede Position des Drehpunkts wird die Standardabweichung zwischen den AR-Funktionen und den erfassten Punkten berechnet, wobei nach dem Minimum der Standardabweichung gesucht wird.



Peikko® Wall Shoes

- Comfortable and fast bolt connection, no welding needed
- Invisible after installation
- Working connection once installed

www.peikko.com

Fig. 4 AR-AIC method (orange line), AIC-Maeda method (green line), contact pressure 0.025 MPa (F=50N).

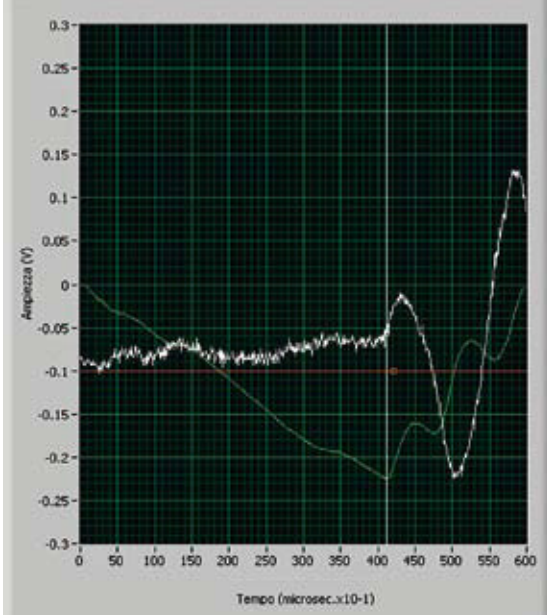


Abb. 4 AR-AIC-Methode (orange Kurve), AIC-Maeda-Methode (grüne Kurve), Anpressdruck 0,025 MPa (F=50N).

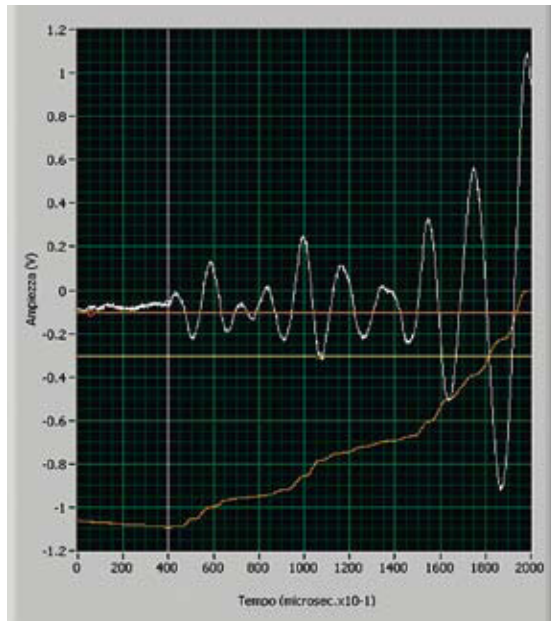


Table 3 Execution time of AR-AIC and AIC-Maeda algorithms using F=30N.

Tabelle 3 Ausführungszeit der Algorithmen AR-AIC und AIC-Maeda bei F=30N.

Window divisions	AR-AIC timing (ms)	AIC-Maeda timing (ms)	(%)	AR-AIC:	
				i=2,...,16	
Teilungen	AR-AIC Zeit (ms)	AIC-Maeda Zeit (ms)	(%)	AR-AIC: i=2,...,16	AIC-Maeda: i=2,...,16
500	315	4	1,270	-	-
600	388	5	1,289	1,2	1,3
700	531	7	1,318	1,7	1,8
800	711	9	1,266	2,3	2,3
900	889	11	1,237	2,8	2,8
1000	1117	14	1,253	3,5	3,5
1500	2463	30	1,218	7,8	7,5
2000	4444	53	1,193	14,1	13,3
3000	9956	121	1,215	31,6	30,3
4000	17786	232	1,304	56,5	58,0
5000	27757	355	1,207	88,1	83,8
6000	39870	479	1,201	126,6	119,8
7000	54572	671	1,230	173,2	167,8
8000	71980	847	1,177	228,5	211,8
9000	90796	1083	1,193	288,2	270,8
10000	111010	1320	1,189	352,4	330,0

Aufgrund der Wellenform im Zeitbereich nimmt der Akaike-Algorithmus die folgende autoregressive Funktion an:

$$x_t = \sum_{m=1}^M a_m x_{t-m}^i + e_t^i$$

wobei

$t = 1, \dots, M$ für Intervall 1

$t = N-M+1, \dots, N$ für Intervall 2

e_t : ist das Rauschen (Gauß'sche Variable)

$a_m^i = (1, \dots, M)$: Autoregressionskoeffizienten.

Die Autoregressionsfunktion AR-AIC teilt die Wellenform in zwei Komponenten: eine deterministische und eine nichtdeterministische, d. h. das Rauschen, das als eine Gauß'sche Verteilung aufweisend angenommen wird.

Akaike-Maeda-Methode

Maeda [5] schlägt eine andere Methode vor, die sich vom autoregressiven Verfahren (AR) unterscheidet und AIC-Maeda (Akaike Information Criterion-Maeda) genannt wird. Dabei wird die Funktion AIC direkt aus der Wellenform gewonnen anstatt über die Autoregressionskoeffizienten. Die AIC-Funktion kann daher direkt berechnet werden, und die Ordnung des AR-Modells ist nicht mehr erforderlich. Für die Realisierung des Vorteils der höheren Rechenleistung ist offensichtlich, dass in jedem Fall die Festlegung eines Zeitfensters um den Ankunftszeitpunkt herum notwendig ist. Dieses Fenster gliedert sich ausgehend von einem Drehpunkt, der sich zwischen einem Maximum und einem Minimum der Wellenform befindet, in zwei Teile.

Wenn also p als letzter Wert des ersten Teils definiert wird (die Abtastung beginnt mit $i = 0$), dann sollte dies zu Ergebnissen führen, die folgende Bedingung erfüllen: $3 \leq p \leq N-5$. Für jede Position von p innerhalb des angegebenen Intervalls (und daher für das $N-7$ -Fache) wird ein Parameter wie folgt berechnet:

$$AIC = (p+1) \cdot \ln(\text{Standardabw. 1}) + (N-p-1) \cdot \ln(\text{Standardabw. 2})$$

wobei $(p+1)$ und $(N-p-1)$ die Dimensionen der beiden Teile darstellen, in der natürlichen Logarithmus ist und sich die Standardabweichung für jeden der zwei Teile wie folgt ergibt:

$$\text{Standardabw.} = [\sum (y_i - \text{Durchschnitt})^2] / (\text{Abtastpunkte} - 1)$$

$$\text{Standardabw. 1} = [\sum (y_i - \text{Durchschnitt 1})^2] / (p)$$

$$\text{Durchschnitt 1} = (\sum y_i) / (p + 1)$$

$$\text{Standardabw. 2} = [\sum (y_i - \text{Durchschnitt 2})^2] / (N-p-2)$$

$$\text{Durchschnitt 2} = (\sum y_i) / (N-p-1)$$

Schließlich werden für die Werte die Minima berechnet, die der Ankunftszeit der Welle entsprechen. Daher ist die Ermittlung des dem globalen Index hinzuzufügenden Minimums des Wertes p erforderlich, wobei der globale Index die Position der Abtastungen in Bezug auf den Nullzeitpunkt wie folgt darstellt:

$$\text{Ankunftszeit} = (\text{Index für das Startfenster} + p_{\min}) \cdot \text{Abtastbereich} (0,5 \mu\text{s})$$

Versuch der automatischen Zeiterfassung

Die erfassten Signale wurden mit Hilfe einer Software analysiert, die von der F+E-Abteilung von Controls S.r.l entwickelt wurde, wobei NI LabVIEW eingesetzt wurde (Abb. 1).

where $(p+1)$ and $(N-p-1)$ are the dimensions of the two parts, \ln is the natural logarithm and the standard deviation of each of the two parts is calculated as follows:

$$\text{std. deviation} = [\sum (y_i - \text{average})^2] / (\text{sampling points} - 1)$$

$$\text{std. deviation 1} = [\sum (y_i - \text{average 1})^2] / (p)$$

$$\text{average 1} = (\sum y_i) / (p + 1)$$

$$\text{std. deviation 2} = [\sum (y_i - \text{average 2})^2] / (N-p-2)$$

$$\text{average 2} = (\sum y_i) / (N-p-1)$$

Finally, the minimum of the values is calculated, which corresponds to the arrival time of the wave.

It is thus necessary to establish the minimum p value to be added to the global index that describes the position of the samples with respect to the zero time as follows:

$$\text{Arrival time} = (\text{index for the starting window} + p_{\min}) \cdot \text{sampling range} (0.5 \mu\text{s})$$

Automatic time picking trial

The signals have been analyzed through a software developed by the R&D department of CONTROLS S.r.l, using NI LabVIEW (Fig. 1).

All of the discussed algorithms for arrival time determination have been implemented in the software in order to evaluate their in-situ performance.

Of each wave analyzed, the signal is captured in terms of amplitude/time, frequency spectrum and characteristic functions. All methods assume that a defined window is focused where the arrival time is identified. The window is defined on the basis of the point identified by the fixed threshold, one preceding and one following point. The algorithms are evaluated with respect to their consistency under unfavorable site conditions such as low contact pressure, high noise level and attenuated signal. Under favorable conditions (typically in the laboratory), all the algorithms give reliable results.

The reference method is the visual determination by an expert operator: in relevant research studies (e.g. [6]), the manual reading represents the reference method to evaluate the reliability of the algorithm for automatic time picking.

The test setup is basically composed of an ultrasonic pulse velocity tester, a digital oscilloscope and a load cell connected to a suitable read-out unit whilst the specimen is a 150 mm concrete cube (Fig. 2).

Performance tests: automatic picks vs. manual picks

The contact pressure has been varied as shown in Table 1. The arrival time was visually determined as 3750 m/s. The threshold value for the fixed threshold method is 300 mV, and the ratio for the STA/LTA method is 0.15.

From the diagram in Fig. 3, it is deduced that starting from a pressure of 0.075 MPa, which corresponds to a 150 N load, the time measured through the two algorithms remains constant. For lower values (down to 0.020 MPa), the only two reliable methods are AR-AIC and AIC-Maeda. Finally, for the minimum load value of 30 N, the AIC-Maeda method is the only approach that yields consistent and reliable results (Fig. 3).

Table 2 shows that the AIC-Maeda method reveals percentage differences lower than 3% for wave speeds in the complete load range when compared to manual picking.

The plots represented in Fig. 4 show that AR-AIC (orange line) is not as clear as AIC-Maeda (green line).

Alle diskutierten Algorithmen zur Ermittlung der Ankunftszeit wurden im Programm implementiert, um ihre Leistungsfähigkeit in situ zu untersuchen.

Von jeder erfassten Welle wird das Signal in Bezug auf Amplitude-Zeit, Frequenzspektrum und die charakteristischen Funktionen ausgewertet.

Sämtliche Methoden sehen vor, dass ein definiertes Fenster dargestellt wird, innerhalb dessen der Ankunftszeitpunkt festzustellen ist. Dieses Fenster wird auf Grundlage des Zeitpunktes bestimmt, der durch den festen Schwellenwert sowie einen vorhergehenden und einen nachfolgenden Punkt ermittelt wurde.

Die Algorithmen werden hinsichtlich ihrer Konsistenz unter nicht optimalen Anwendungsbedingungen (z. B. schwacher Anpressdruck, hoher Rauschpegel, abgeschwächtes Signal) geprüft, da unter günstigen Verhältnissen (i. d. R. im Labor) alle Algorithmen zuverlässige Ergebnisse erbringen.

Das Referenzverfahren ist dabei die visuelle Erfassung durch einen erfahrenen Techniker: In einschlägigen Veröffentlichungen zu Forschungsprojekten (z.B. [6]) stellt die manuelle Ablesung das Referenzverfahren dar, um die Zuverlässigkeit des Algorithmus für die automatische Bestimmung des Ankunftszeitpunkts zu beurteilen.

Der Versuchsaufbau besteht dabei aus dem Gerät zur Prüfung der Ultraschall-Impulsgeschwindigkeit, einem Digitaloszilloskop und einer Kraftmessdose, die mit einer geeigneten digitalen Ausleseinheit verbunden ist. Der Probekörper ist jeweils ein Betonwürfel mit 150 mm Kantenlänge.



ECORATIO

Betopro®

“Naturally Smooth”

Betopro®

Concrete release agent for the precast industry

- Perfect surface finishing
- Environmentally friendly
- Inhibiting corrosion
- Cost-effective

ECORATIO B.V.
 Industrieweg 161 - 3044 AS - Rotterdam, The Netherlands
 tel: +31 88 22 44 440 - www.ecoratio.com

Compared to the AR-AIC method, AIC-Maeda is much simpler as regards the formulae used, resulting in an execution time that is shorter by about 1%.

Conclusions

We have presented the AIC-Maeda algorithm as a tool for automatic P-phase picking. The picker has been tuned and implemented in a dedicated software. Individual visual comparisons of the automatic picks with the manually established values showed that manual picking reliability can be considerably improved by the automatic method, which indicates that AIC-Maeda is sufficiently robust to handle in-situ arrival times and a very useful tool to improve the accuracy in manual picking.

The automatic picking method enables a reliable, near-real time onsite analysis utilizing only a small amount of computing power at a reasonably low cost. Obtaining reliable in-situ arrival times in near-real time offers the opportunity of applying various detailed signal processing analyses, such as energy measurement and reduction or the analysis of the spectrum of the waveform frequency using the Fourier, Gabor and Wavelet theories.

On the basis of the experimental studies presented in this article, the AIC-Maeda method has been implemented on the new Ultrasonic Pulse Analyzer, CONTROLS model 58-E4900 (Fig. 5), which provides a unique feature for high-quality testing and also unrivaled value for the customer. ■

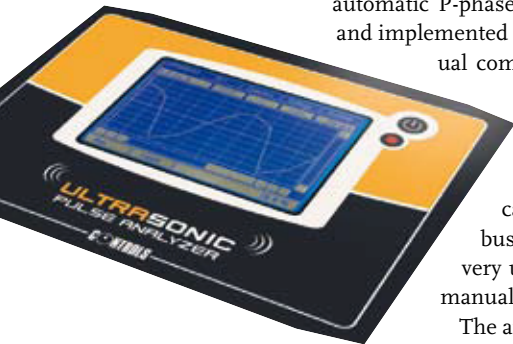


Fig. 5 Ultrasonic Pulse Analyzer, Controls model 58-E4900, featuring the AIC-Maeda algorithm for the accurate determination of the arrival time.

Abb. 5 Ultraschall-Impulsanalysator (Controls Modell 58-E4900) mit der innovativen Funktion AIC-Maeda zur präzisen Messung der Ankunftszeit.

References

- [1] A. D'Amico, R. Felicetti. Ultrasonic Investigations on Concrete Structures. Master of Engineering thesis. Flli Pesenti Master School, Politecnico di Milano (Italy). 2007.
- [2] M. Baer, U. Kradošfer, An automatic phase picker for local and teleseismic events, Bulletin of the Seismological Society of America 77 (1987) 1437–1445.
- [3] U. Grosse, H.W. Reinhardt, A.T. Herb. Ultrasound in Through-Transmission.
- [4] H. Akaike, Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average process, Annals of the Institute of Statistical Mathematics 26 (1974) 363–387.
- [5] N. Maeda, A method for reading and checking phase times in auto-processing system of seismic wave data, Zisin = Jishin 38 (1985) 365–379.
- [6] R. Sleeman, T. Van Eck. Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. Physics of earth and planetary interiors, paper, 1998.
- [7] G. Kitagawa, H. Akaike, A procedure for the modelling of non-stationary time series, Annals of the Institute of Statistical Mathematics 30 (Part B) (1978) 351–363.
- [8] H. Kurz, U. Grosse, H. Reinhardt. Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete. Ultrasonics, paper, 2004.
- [9] H.W. Reinhardt, C. U. Grosse. Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. Construction and Building Materials, paper, 2003.
- [10] R. Sleeman, T. Van Eck. Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. Physics of earth and planetary interiors, paper, 1998.
- [11] Jones, R., Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique, RILEM Int. Symp. on Nondestructive Testing of Materials and Structures, Paris, Vol. 1, Paper No. A-17 January 1954, 137. RILEM Bull., 19 (Part 2), Nov. 1954.
- [12] Kaplan, M.F., The effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete, Mag. Concr. Res., 11(32), 85, 1959.
- [13] Bungey, J.H. The validity of ultrasonic pulse velocity testing of in-place concrete for strength. NDT International, IPC Press, Dec. 1980, pp. 296–300.
- [14] RILEM Recommendation NDT 1, Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, Paris, Dec. 1972.
- [15] Tomsett, H.N. Ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality. Magazine of Concrete Research, 32, No. 110, March 1980, 7–16.
- [16] Swamy, R.N. and Al-Hamed, A.H. The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air dried cubes and hence in-situ strength of concrete. Spec. Publ. SP 82–13, American Concrete Institute, Detroit, 1984, 247–276.

Prüfungen der Leistungsfähigkeit: automatische vs. manuelle Erfassung

Der Anpressdruck wurde gemäß den Angaben in **Tabelle 1** variiert. Die visuelle Ermittlung der Ankunftszeit ergibt einen Wert von 3750 m/s. Der für die Methode des festen Schwellenwertes gewählte Schwellenwert beträgt 300 mV, das Verhältnis bei der Methode STA/LTA 0,15. Aus dem Diagramm in **Abb. 2** geht hervor, dass die über die beiden Algorithmen gemessene Zeit ab einem Druck von 0,075 MPa, der einer einwirkenden Last von 150 N entspricht, konstant bleibt. Bei niedrigeren Werten bis zu 0,020 MPa sind die einzigen beiden Methoden, die sich als zuverlässig erwiesen haben, AR-AIC und AIC-Maeda. Für den Mindestwert der einwirkenden Last von 30 N erbringt AIC-Maeda als einzige Methode konsistente und zuverlässige Ergebnisse.

Aus **Tabelle 2** ergibt sich, dass die Methode AIC-Maeda im gesamten berücksichtigten Lastbereich prozentuale Abweichungen der Wellengeschwindigkeit im Vergleich zur manuellen Methode aufweist, die unter 3 % liegen.

Die in **Abb. 4** dargestellten Plots zeigen, dass AR-AIC (orange Kurve) nicht so eindeutige Ergebnisse erbringt wie AIC-Maeda (grüne Kurve).

Die Methode AIC-Maeda erweist sich gegenüber AR-AIC als wesentlich einfacher hinsichtlich der verwendeten Formeln, was zu einer um ca. 1 % kürzeren Ausführungszeit führt.

Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Beitrag wurde die Methode AIC-Maeda zur automatischen Erfassung der P-Phase vorgestellt. Das Erfassungstool wurde abgestimmt und in einer eigens hierfür vorgesehenen Software implementiert. Die einzelnen visuellen Vergleiche der automatischen Erfassungen mit den manuellen Messungen zeigten, dass die Zuverlässigkeit der manuellen Erfassung durch das automatische Verfahren wesentlich erhöht werden kann, was darauf hinweist, dass die Methode AIC-Maeda für die Verarbeitung von Ankunftszeiten in situ hinreichend robust ist und ein sehr hilfreiches Tool zur Erhöhung der Genauigkeit der manuellen Erfassung darstellt.

Das automatische Erfassungsverfahren ermöglicht mit nur geringer Rechenleistung und zu relativ niedrigen Kosten die Durchführung einer zuverlässigen Analyse in situ und nahezu in Echtzeit. Die zuverlässige In-situ-Ermittlung der Signal-Ankunftszeit nahezu in Echtzeit bietet die Möglichkeit der Anwendung unterschiedlicher detaillierter Signalverarbeitungsanalysen wie der Energiemessung und -reduzierung oder der Analyse des Spektrums der Wellenfrequenzen mittels Fourier-, Gabor- und Wavelet-Theorien.

Auf Grundlage der vorgestellten experimentellen Untersuchungen wurde die Methode AIC-Maeda im neuen Ultraschall-Impulsanalysator (CONTROLS Modell 58-E4900) (**Abb. 5**) implementiert, was ein einzigartiges Funktionsmerkmal für Prüfungen in hoher Qualität darstellt und dem Kunden einen bisher unerreichten Nutzen bringt. ■

Alessandro D'Amico