

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Niederleithinger, Ernst; Krompholz, Rolf; Müller, Sabine; Lautenschläger, Reiner; Kittler, Jan

36 Jahre Talsperre Eibenstock – 36 Jahre Überwachung des Betonzustands durch Ultraschall

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103377>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Niederleithinger, Ernst; Krompholz, Rolf; Müller, Sabine; Lautenschläger, Reiner; Kittler, Jan (2015): 36 Jahre Talsperre Eibenstock – 36 Jahre Überwachung des Betonzustands durch Ultraschall. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 53. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 171-180.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



36 Jahre Talsperre Eibenstock – 36 Jahre Überwachung des Betonzustands durch Ultraschall

Ernst Niederleithinger
Rolf Krompholz
Sabine Müller
Reiner Lautenschläger
Jan Kittler

Block B3
Saal 5

Ultraschall-Transmissionsmessungen werden seit Jahrzehnten bei der Qualitätssicherung von Betonkonstruktionen eingesetzt. Aus den Wellengeschwindigkeiten lassen sich dynamische Elastizitätsmoduln und – nach lokaler Kalibrierung – auch Druckfestigkeiten ermitteln. Zudem ergeben sich Hinweise auf Risse und andere Materialschwächungen. Der Einsatz erfolgt vor allem im Labor oder an der Bauwerksoberfläche. Neuerdings werden auch Monitoringsysteme mit eingebetteten Sensoren auf Ultraschallbasis erfolgreich getestet.

Die Talsperre Eibenstock dient als größte Sperre in Sachsen der Trinkwasserversorgung und dem Hochwasserschutz. Hier wurden während der Bauphase im Jahr 1979 im Fußbereich des Mauerkörpers Ultraschallsensoren eingebracht, die in Verbindung mit einem Messoszilloskop eine Überwachung der Erhärtung des Mauerbetons ermöglichten.

Der für die Sensorauswahl eingesetzte Messstellenumschalter wurde im September 2011 grundlegend instand gesetzt. Danach zeigte sich, dass die eingebetteten Sensoren selbst sowie die Verkabelung auch nach über fünfunddreißig Jahren in einwandfreiem Zustand sind. Eine nunmehr aufgelegte Messserie mit modernem Gerät von über einem Jahr mit ein- bis zweimonatigen Intervallen zeigte, dass die Wellengeschwindigkeit seit der Bauphase noch einmal um gut 10 % zugenommen hat, was für eine erhöhte Druckfestigkeit spricht. Innerhalb des Jahres zeigten sich auch bei Einsatz neuer, sehr sensibler Auswertemethoden (sog. Codawelleninterferometrie) nur geringfügige Schwankungen. Diese waren auch nicht zu erwarten, da sich die Füllhöhe zu den Messzeitpunkten nur gering unterschied, die Temperatur im Bauwerksinneren nur wenig schwankte und der Bauwerkszustand sehr gut ist.

Die Aussagen zur Betongüte sind direkt vergleichbar mit den früheren Mess- und Untersuchungsergebnissen an der Talsperre Gottleuba, die im gleichen Zeitraum errichtet wurde und ebenfalls mit einem Ultraschallsystem ausgerüstet war.

Die Experimente zeigten, dass ein Einsatz von Ultraschallsystemen für die Bauwerksüberwachung auch über Jahrzehnte möglich ist. Dies war im vorliegenden

Fall nie geplant, aber durch den Einsatz der Mitarbeiter vor Ort und der Herstellerfirma möglich. Bei zukünftigen Systemen ist eine langfristige Planung unter Einbeziehung aller Beteiligten sowie eine Einbindung in Überwachungs- und Wartungspläne notwendig, damit die qualitätsgesichert gewonnenen Daten gewinnbringend genutzt werden können.

Stichworte: Ultraschall, Beton, Überwachung, Monitoring

1 Einführung

Ultraschall-Transmissionsmessungen werden seit Jahrzehnten bei der Qualitätssicherung von Betonkonstruktionen eingesetzt. Aus den Wellengeschwindigkeiten lassen sich dynamische Elastizitätsmoduln und – nach lokaler Kalibrierung – auch Druckfestigkeiten ermitteln. Zudem ergeben sich Hinweise auf Risse und andere Materialschwächungen. Auch Stress, Temperatur und Feuchte spiegeln sich in den Geschwindigkeiten wieder.

Der Einsatz erfolgt vor allem im Labor an Probekörpern oder vor Ort an der Bauwerksoberfläche. Neuerdings werden auch Monitoringsysteme mit eingebetteten Sensoren auf Ultraschallbasis erfolgreich getestet. Hierbei wird immer wieder die Frage nach der Dauerhaftigkeit der Sensoren diskutiert. Wünschenswert wäre, dass die eingebetteten Sensoren über Jahrzehnte wartungsfrei arbeiten. Der Nachweis hierfür ist aber nur schwer zu führen.

In der Talsperre Eibenstock wurden in der Bauphase experimentell mehrere Piezosensoren verbaut, um lokal die Erhärtung des Betons zu verfolgen. Die Sensoren blieben samt Anschlüssen bis heute erhalten, sodass sie nun auf ihre Funktionsfähigkeit und ihre Eignung für eine Dauerüberwachung getestet werden konnten.

2 Betonüberwachung mit Ultraschall

Ultraschallmessungen werden seit Jahrzehnten zur Bauwerksüberwachung und zur Baustoffuntersuchung eingesetzt. Über passende Sensoren werden Wellen mit Frequenzen zwischen 25 und 400 kHz in das Objekt gesendet und von weiteren Sensoren in Reflektions- oder Transmissionsanordnung empfangen. Aus den Einsatzzeiten der Signale lassen sich bei Kenntnis der Wellenwege und der Dichte ρ die Geschwindigkeiten von Kompressions- (c_p) und Scherwellen (c_s) berechnen und daraus Parameter wie Kompressionsmodul E , Schubmodul G oder Poissonzahl ν ableiten:

$$c_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{bzw.} \quad c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

Die elastischen Parameter und damit auch die Geschwindigkeiten sind auch von Zustandsparametern wie Stress, Temperatur oder Feuchte abhängig (z. B. *Wolf et al.*, 2014).

Über Korrelationen lassen sich aus den dynamischen Parametern auch Rückschlüsse auf statische Parameter oder die Druckfestigkeit ziehen. Mit passenden Messanordnungen und anderen Messparametern lassen auch Informationen zu Rissen, Ermüdung und anderen Schäden ermitteln. Bildgebende Verfahren zur Strukturerkundung und Lokalisierung von Einbauten sind ebenfalls möglich. Der Stand der Technik ist in DIN EN 12504-4:2004-12 und dem DGZfP-Merkblatt B8 geregelt.

3 Installation in Eibenstock

3.1 Die Talsperre Eibenstock

Die Talsperre Eibenstock (Abbildung 1) ist die größte Sperre in Sachsen. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, Haushalte, Industrie und Gewerbe im Raum Chemnitz und Zwickau mit Trinkwasser zu versorgen. Sie dient aber auch dem Hochwasserschutz und höht in niederschlagsarmen Perioden den Wasserstand der Zwickauer Mulde auf. Das Wasser der Talsperre wird außerdem zur Energieerzeugung genutzt. Der Baubeginn erfolgte 1974. Der Probestau begann im März 1981. 1982 erfolgte die erste Wasserabgabe an das Wasserwerk, wobei die letzten Arbeiten erst 1987 abgeschlossen wurden. Die Staumauer besteht aus 26 nebeneinander stehenden Feldern, die durch Fugen konstruktiv getrennt sind.



Abbildung 1: Talsperre Eibenstock (Foto: LTV)

3.2 Instrumentierung 1979

Am 3. 4. 1979 wurden kurz vor Betonage im Fußbereich des Mauerkörpers in Feld 15/ Block A9 zwölf Ultraschallsensoren (8 Sender, 4 Empfänger, Abbildung 2 links, Abbildung 3) eingebracht, die in Verbindung mit einem Umschalter im unteren Kontrollgang und einem Messoszilloskop (Abbildung 2 rechts) eine Überwachung der Erhärtung des Mauerbetons ermöglichten. Die Sensoren erzeugen bzw. empfangen in Richtung ihrer Achse vor allem Kompressionswellen. Da bestimmte Kombinationen rechtwinklig oder gar äquatorial zueinander angeordnet sind, können auch Scherwellen registriert werden.

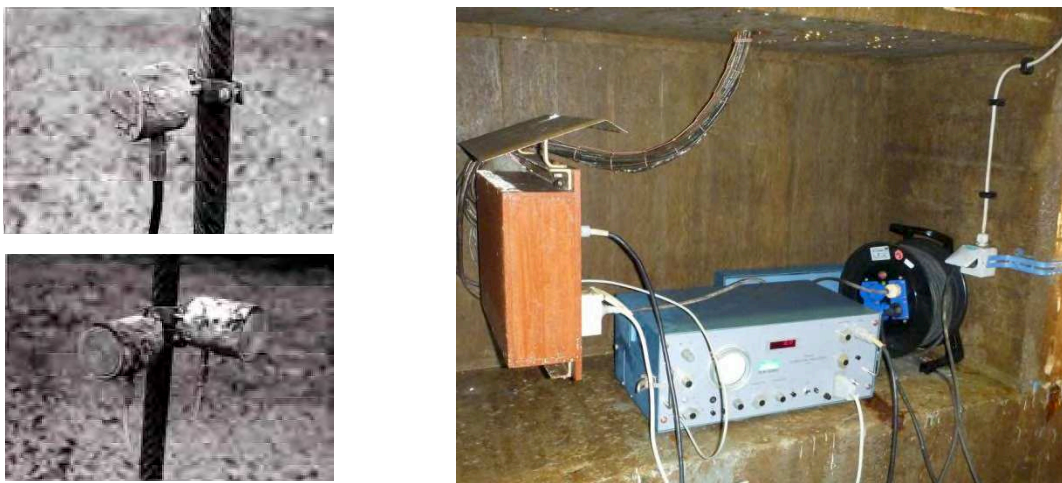


Abbildung 2: Links oben: Ultraschall-Sender vor dem Betonieren. Links unten: dto., Empfänger. Rechts: Umschalter und Messoszilloskop.

Sieben Tage nach Betonage begannen die Messungen, bei denen für alle möglichen 32 Sender/Empfänger-Kombinationen die Laufzeiten gemessen und daraus der Mittelwert der Geschwindigkeiten bestimmt wurde. Nach den Gleichungen (1) wurden bei bekannter Materialdichte die elastischen Parameter berechnet. Die Messungen wurden über fünf Jahre fortgesetzt (Abbildung 4, *VEB Prowa*, 1985). Es zeigt sich, dass schon nach 28 Tagen ein hohes, den Anforderungen voll entsprechendes Niveau erreicht war (dyn. E-Modul über 40 GPa). Nach einem halben Jahr zeigten sich keine signifikanten Änderungen mehr (ca. 47 GPa). Ein Zusammenhang mit der Stauhöhe war nicht zu beobachten.

Die Aussagen zur Betongüte sind direkt vergleichbar mit den früheren Mess- und Untersuchungsergebnissen an der Talsperre Gottleuba, die im gleichen Zeitraum errichtet wurde und ebenfalls mit einem Ultraschallsystem ausgerüstet war.

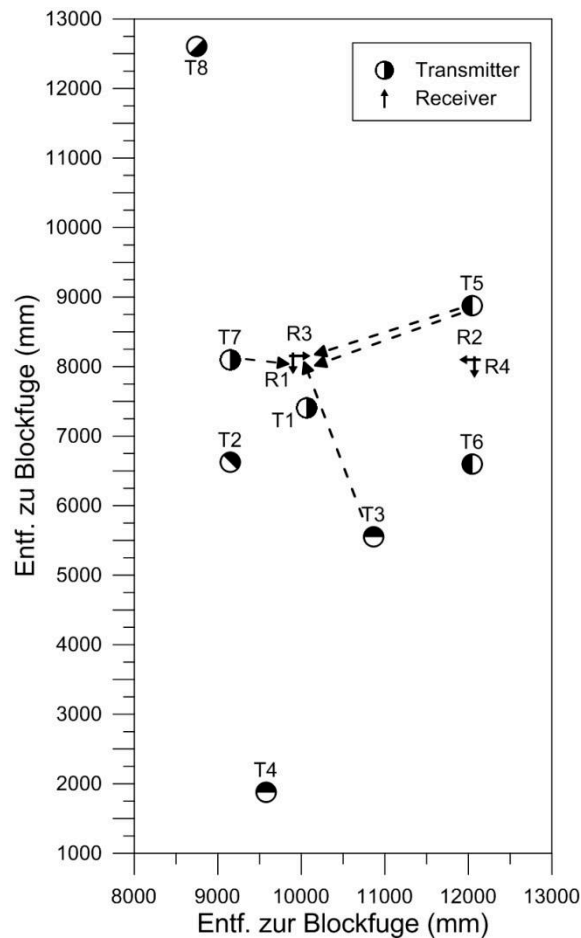


Abbildung 3: Anordnung der Sensoren im Block 15 (Plan-Aufsicht). Pfeile: Im Text erwähnte Messstrecken.

3.3 Wiederinbetriebnahme 2011

Bei einem Fachbesuch an der Talsperre im Frühjahr 2011 wurde beschlossen, die Messeinrichtung wieder in Betrieb zu nehmen. Dazu wurde der für die Sensorauswahl eingesetzte, mit der Zeit intern korrodierte Messstellenumschalter im September 2011 durch die Fa. Geotron im Auftrag der LTV grundlegend instandgesetzt. Danach zeigt sich, dass die eingebetteten Sensoren selbst sowie Verkabelung und Messoszilloskop auch nach gut 35 Jahren in einwandfreiem Zustand waren. Testweise wurde durch die Fa. Geotron ein moderneres Messgerät eingesetzt und die Kompressionswellengeschwindigkeit bestimmt. Die Abweichung zwischen den Messtechnik-Generationen betrug unter 1%. Die mittlere Wellengeschwindigkeit hat sich im Laufe der Zeit noch einmal etwas erhöht (Abbildung 4).

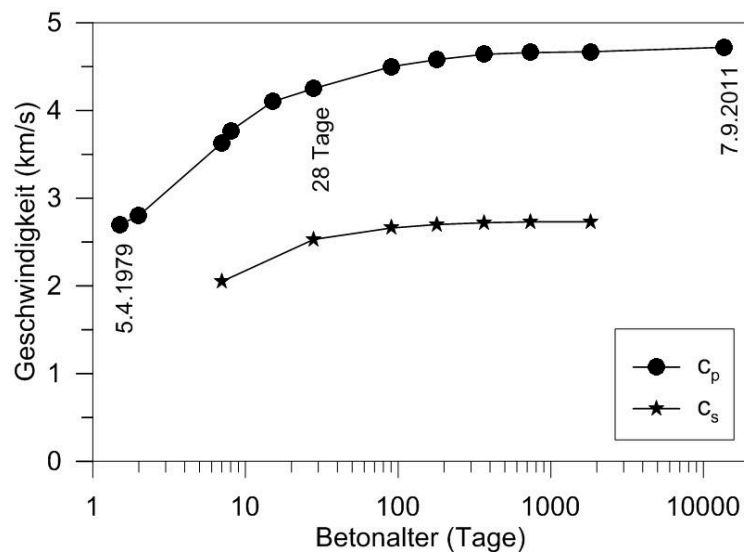


Abbildung 4: Geschwindigkeitsentwicklung abhängig vom Betonalter

3.4 Dauerüberwachung 2011 - 2013

Eine nunmehr durch die BAM mit Unterstützung der LTV aufgelegte Messserie mit modernem Gerät der Fa. Geotron über fast zwei Jahre mit unterschiedlichen Intervallen diente dem Test neuer, sensibler Auswertelgorithmen und der Bestimmung der Wiederholbarkeit und Schwankungsbreite der Messungen. Außerdem sollten etwaige Schwankungen mit der Stauhöhe oder den Jahreszeiten erfasst werden.

In Abbildung 5 sind als Beispiel die Messspuren für die Sensorkombination T3-R1 gezeigt. Die Einsätze von Kompressions- und auch Scherwellen sind klar zu erkennen, letzteres da Sender und Empfänger senkrecht zueinander stehen. Es zeigen sich kaum signifikante Unterschiede über die Zeit, auch nicht zu den mit einer älteren Messapparatur aufgenommenen Daten von 2011 (unten in der Abbildung).

Den einzelnen Messreihen wurden die Laufzeiten für die verschiedenen Wellentypen entnommen und die Geschwindigkeiten berechnet. Für die Ersteinsätze der Kompressionswellen kam dabei der automatische AIC-Picker zum Einsatz, die Scherwellenlaufzeiten wurden manuell abgegriffen. Abbildung 6 zeigt die Entwicklung der Kompressionswellengeschwindigkeit im Beobachtungszeitraum. Die Schwankungen sind jeweils sehr klein (unter 1%) und zwischen den verschiedenen Kombinationen nicht korreliert. Es ergeben sich also keine Hinweise auf Zustandsänderungen im Beton. Das unterschiedliche Niveau erklärt sich wahrscheinlich durch Verschiebungen der Sensoren bei der Betonage und somit leicht fehlerhafte Distanzangaben.

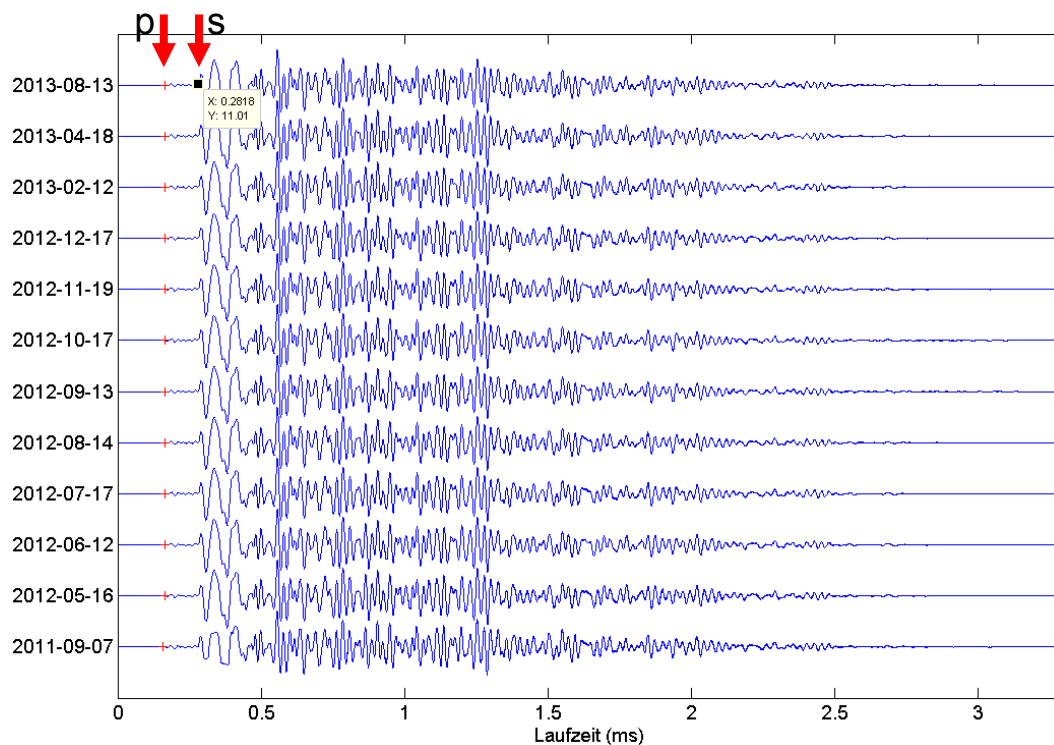


Abbildung 5: Messreihen für Sender T1 – Empfänger R3. Pfeile oben: Einsatz von Kompressions- (p) und Scherwelle(s).

Für Scherwellen sind die Schwankungen noch geringer (Abbildung 7, man beachte die extrem gestreckte Abszisse). Dies gilt erst recht, wenn man die Geschwindigkeitsänderungen statt durch manuelles Abgreifen der Einsätze mit der Codawellen-Interferometrie (CWI) bestimmt. Diese sehr sensible Methode bewertet den gesamten Wellenzug durch Korrelation mit einer Referenz (hier: Messung von 2011) und ist in der Lage, Geschwindigkeitsänderungen von wenigen zehntel Promille zu erkennen. Damit lassen sich schon kleine Temperatur- oder Laständerungen im Beton sowie Schädigungen erkennen (*Wunderlich & Niederleithinger, 2012, Niederleithinger et al., 2014, Wolf et al., 2014*). Darauf gibt es hier aber keinen Hinweis. Auch der bei manuellem Auswerten sichtbare kleine Unterschied zwischen 2011 und den späteren Messungen (Apparaturwechsel) ist weitgehend korrigiert.

Innerhalb des Jahres zeigten sich auch bei Einsatz neuer, sehr sensibler Auswertemethoden (sog. Codawellen-Interferometrie) nur geringfügige Schwankungen. Diese waren auch nicht zu erwarten, da sich die Füllhöhe zu den Messzeitpunkten nur gering unterschied, die Temperatur im Bauwerksinneren nur wenig schwankte und der Bauwerkszustand sehr gut ist.

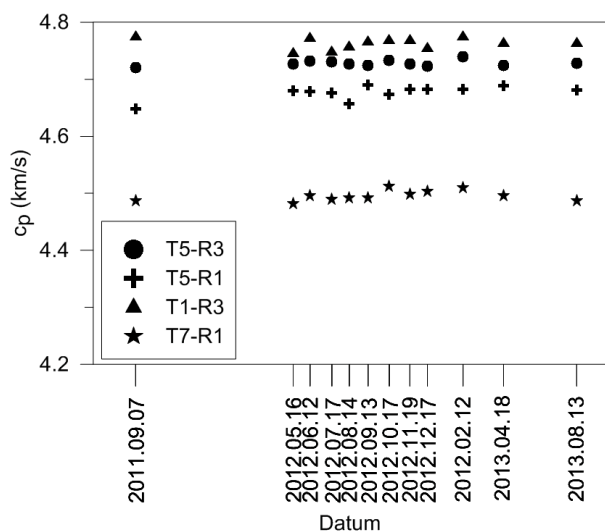


Abbildung 6: Geschwindigkeitsentwicklung (Kompressionswellen) für verschiedene Sender-Empfänger-Kombinationen.

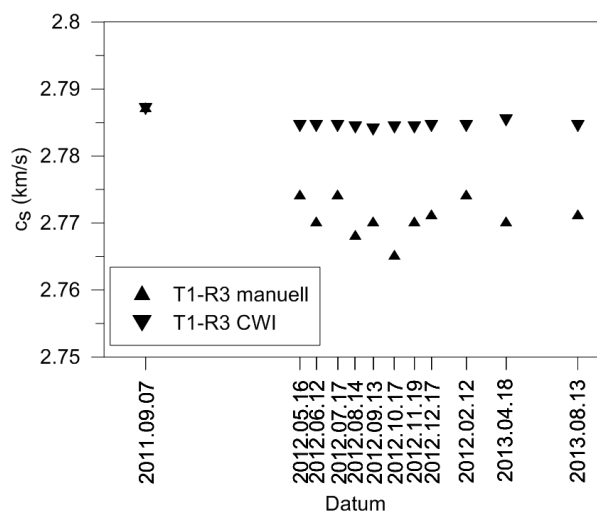


Abbildung 7: Geschwindigkeitsentwicklung (Scherwellen) für eine Kombination, aber unterschiedliche Auswertungen

4 Zukünftige Monitoringsysteme

Zu den vor 36 Jahren eingebauten Sensortypen existieren Nachfolgemodelle der Fa. Geotron. Als Alternative wurden im Auftrag der BAM etwas kleinere Sensoren entwickelt (Abbildung 8 links), mit denen Betonkonstruktionen auch nachträglich instrumentiert werden können (Wolf et al. 2014). Diese Sensoren können sowohl als Sender als auch als Empfänger dienen oder zwischen beiden Rollen umgeschaltet werden. In Verbindung mit computergesteuerten Multiplexern (Messstellenumschaltern) sowie passender Übertragungs- und Steuerungstechnik lassen sich die Sensoren in neue oder bestehende Überwachungssysteme integrieren und automatisiert betreiben. Experimentell wurden bisher Probekörper an der BAM sowie Brücken in der Türkei (Abbildung 8 rechts) und Polen instrumentiert.

Auch auf der Auswerteseite sind in naher Zukunft Fortschritte zu erwarten. Die bisher auf einzelne Sensorpaare limitierte Codawelleninterferometrie lässt sich zu tomographischen Systemen erweitern, die räumlich die Veränderung von Material- und Zustandsparametern überwachen. Erste Versuche – bisher im Wesentlichen an Probekörpern – sind außerordentlich vielversprechend (Abbildung 9).

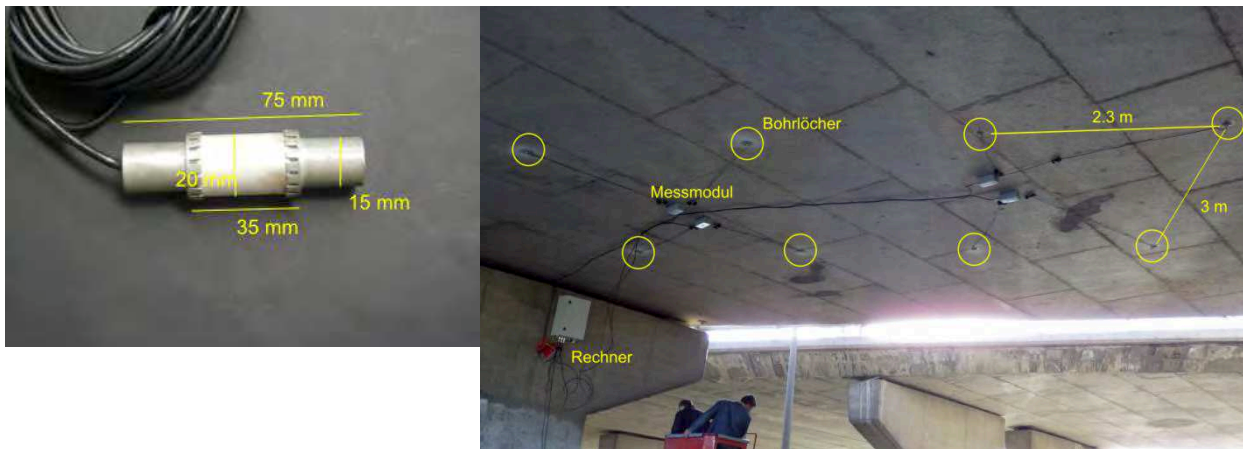


Abbildung 8: Links: Ultraschallsensoren zur baubegleitenden oder nachträglichen Instrumentierung von Betonkonstruktionen. Rechts: Nachträglich installiertes Sensornetzwerk samt Mess- und Übertragungstechnik an einer Brücke in der Türkei (aus: *Wolf et al.* 2014)

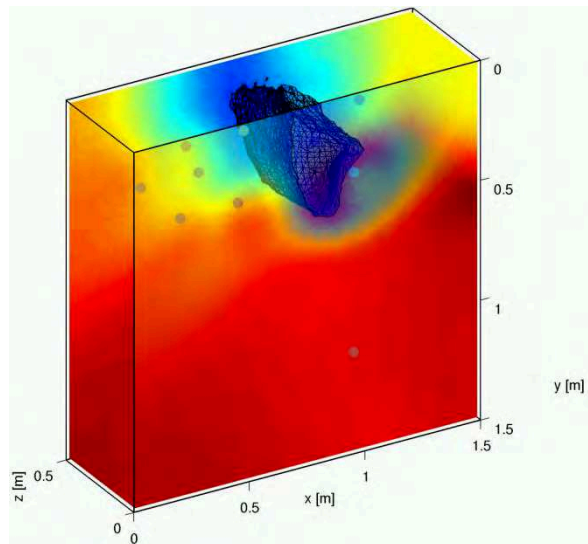


Abbildung 9: Links: Belastung eines Betonprobekörpers durch lokale Kompression. Rechts: Visualisierung des Stressfeldes durch Auswertung der Dekorrelation der Ultraschall-Coda. (aus: *Niederleithinger et al.*, 2014)

5 Zusammenfassung

Die Experimente zeigten, dass ein Betrieb von Ultraschallsystemen für die Bauwerksüberwachung auch über Jahrzehnte möglich ist. Dies war im vorliegenden Fall nie geplant, aber durch den Einsatz der Mitarbeiter vor Ort und der Herstellerfirma möglich. Mit eingebauten Ultraschallsensoren und entsprechenden Dauermessungen kann mit moderner Software sehr sensibel nicht nur die Erhärtung des Betons verfolgt werden sondern auch Zustandsschwankungen

oder Ermüdungserscheinungen erkannt werden. An der Talsperre Eibenstock zeigten sich keine derartigen Erscheinungen. Bei zukünftigen Systemen ist eine langfristige Planung unter Einbeziehung aller Beteiligten, eine automatisierte Datenerfassung sowie eine Einbindung in Überwachungs- und Wartungspläne notwendig, damit die qualitätsgesichert gewonnenen Daten gewinnbringend genutzt werden können. Für die Talsperre Eibenstock ist dies aufgrund des ausgezeichneten Bauwerkszustandes und der nur geringen Zustandsschwankungen nicht erforderlich.

6 Literatur

- VEB Prowa (Projektierung Wasserwirtschaft), Magdeburg: Bericht über die in der Talsperre Eibenstock durchgeführten Ultraschallmessungen (1985).
- Niederleithinger, E., und Wunderlich, C.: Influence of Small Temperature Variations on the Ultrasonic Velocity in Concrete. In: *Proceedings of QNDE 2012*, 390–97. Denver. doi:10.1063/1.4789074.
- Niederleithinger, E., Sens-Schönfelder, C., Grothe, S., und Wiggenhauser, H.: Coda wave interferometry used to localize compressional load effects on a concrete specimen. In: *Proceedings of EWSHM 2014*, Nantes, 2014.
- Wolf, J., Niederleithinger, E., Mielentz, F., Grothe, S., & Wiggenhauser, H.: Überwachung von Betonkonstruktionen mit eingebetteten Ultraschallsensoren. *Bautechnik 91/11 (2014)*, p. 783-796.

Autoren:

Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger	Dipl.-Ing. Rolf Krompholz
Dipl. Geophys. Sabine Müller	
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung	Geotron Elektronik Ultraschall-Messtechnik
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin	Leite 2, 01796 Pirna
Tel.: +49 30 8104-1443	Tel.: +49 351 01234 5
E-Mail: Ernst.Niederleithinger@bam.de	E-Mail: info@geotron.de

Reiner Lautenschläger, Staumeister
Jan Kittler, Referatsleiter
Landestalsperrenverwaltung des Landes
Sachsen (LTV)

Bahnstr. 14, 01796 Pirna
Tel.: +49 3501 796-350
E-Mail: jan.kittler@ltv.sachsen.de