

Überwachungskonzept für Talsperren auf Basis ambienter Schwingungsmessungen

Dipl.-Ing. Roman Geier
Dipl.-Ing. Heinz Lutz

Kurzfassung

Erdbeben, Überströmen, Durchströmen (während des Grundablasses) und in gewissen Fällen Verkehr auf der Sperrenkronen stellen die wichtigsten dynamischen Beanspruchungen für eine Talsperre dar und sind bei der Berechnung im Rahmen der Planung zu berücksichtigen. Das Gefahrenpotential, das von einem Erdbeben oder einer geschädigten Talsperre ausgeht, hängt stark von der Region, der dynamischen Übertragungsfunktion des Untergrundes sowie der Art und Intensität der Einwirkung (Risikoabschätzung) auf die Staumauer ab. Um die Sicherheit von Staudämmen und Staumauern zu erhöhen, wurden in der Vergangenheit verschiedene Überwachungssysteme, sogenannte „Monitoring-Systems“, entwickelt. Der Großteil dieser Systeme basiert auf der Erfassung von Deformationen und Verschiebungen der instrumentierten Struktur.

Das in diesem Beitrag beschriebene Überwachungskonzept basiert auf der Analyse ambienter (= umweltbedingter) Schwingungen des Bauwerkes und eröffnet der Erhaltung und Beurteilung des Systems neue Möglichkeiten. Ursprünglich für den Brückenbau entwickelt, zeigten sich auch für Talsperren hervorragende Ergebnisse. Neben den Resultaten die an der Talsperre Schlegeis in Österreich erzielt wurden, soll auch das Überwachungskonzept kurz erläutert werden.

1. Einleitung

Im Bauwesen ist es bis heute üblich, die meisten dynamischen Problemstellungen (Erdbeben, Wind, Wellenschlag, Verkehr, usw.) mittels statischer Ersatzverfahren (Multiplikation von statischen Ersatzlasten mit dynamischen Faktoren) zu lösen. Mit dieser Vorgangsweise können die in einem Bauwerk zufolge dynamischer Einwirkungen auftretenden maximalen Schnittgrößen und Verformungen näherungsweise erfasst werden. Aussagen über das tatsächliche Verhalten unter dynamischen Lasten bzw. zuverlässige Aussagen über das Langzeitverhalten der Struktur können jedoch auf diese Weise nicht erstellt werden.

Das Schwingungsverhalten eines Bauwerkes kann durch eine dynamische Analyse bestimmt werden, die rechnerisch (theoretisch) und/oder messtechnisch erfolgen kann. Durch Messung und Beurteilung des realen Schwingungsverhaltens können Ergebnisse in einem Bereich erzielt werden, die weit über die Möglichkeiten herkömmlicher visuellen Inspektionsverfahren und Methoden hinausgehen. Wird versucht das Schwingungsverhalten rechnerisch am ComputermodeLL zu erfassen, so sind durch die unbekanntenen Randbedingungen die Ergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet. Durch die messtechnische Erfassung der dynamischen Charakteristik kann ein an die Realität kalibriertes Rechenmodell erstellt werden. Weiters ist es möglich, durch dynamische Messungen das Langzeitverhalten und damit den Zustand des Bauwerkes über die Zeit zu beurteilen.

2. Methode

Jedes Bauwerk schwingt nicht nur auf Grund der Einwirkungen von dynamischen Lasten, sondern auch ein Bauwerk dass sich in Ruhe befindet, reagiert durch Schwingungen auf in der Natur immer vorhandene Schwingungen (mikroseismische Erscheinungen oder indirekte Anregung durch dynamische Einflüsse aus der Umgebung). Diese sogenannte ambiente Erregung besitzt die Eigenschaften eines „weißen Rauschens“, d. h. alle relevanten Frequenzen sind im Antwortspektrum nahezu mit gleichem Energiegehalt vertreten. Durch hochempfindlicher Beschleunigungsaufnehmer können diese kleinen, ambienten Erregungen aufgezeichnet werden.

Diese Schwingungen werden im Falle von Talsperren zur Ermittlung der modalen Parameter Eigenfrequenzen (Trendkarten) und Eigenformen verwendet. Dämpfungsparameter und Schwingungsintensitäten sind bei solchen massiven Bauwerken von untergeordneter Bedeutung. Jede Veränderung des Bauwerkes durch Schädigung oder durch eine Veränderung der Randbedingungen (Auflagerung) führt zu einer Abweichung der ursprünglichen modalen Parameter. Ein hochsensibles Messsystem ist in der Lage diese Veränderungen zu ermitteln und entsprechende Warnhinweise zu geben.

Um die Eigenform eines Bauwerkes ausreichend genau bestimmen zu können, müssen die Beschleunigungsaufnehmer so aufgestellt werden, dass eine ausreichende Anzahl von Punkten entlang der Systemlinie erfasst wird. Weiters ist der Referenzsensor so aufzustellen, dass auch für die höheren Eigenformen ein klares Referenzsignal erzielbar ist. Für die Untersuchung an der Talsperre Schlegeis wurde das Messsystem BRIMOS (www.vce.at) eingesetzt. Dieses besteht aus mehreren Modulen, wobei hochempfindlichen Beschleunigungsaufnehmer, die Speicher- und Steuerungseinheit sowie die entsprechende Mess- und Auswertesoftware die maßgebenden Elemente darstellen.

3. Überwachungskonzept

Das von VCE (Vienna Consulting Engineers) für Talsperren entwickelte Überwachungskonzept sieht im Allgemeinen einen mehrstufigen Aufbau vor. Grundlage ist dabei die Basismessung, bei der die maßgebenden Beurteilungsparameter ermittelt werden. Um die Langzeitkontrolle des Systems zu ermöglichen, können einerseits periodische Untersuchungen sowie eine Dauerinstallation zur kontinuierlichen Überwachung eingesetzt werden.

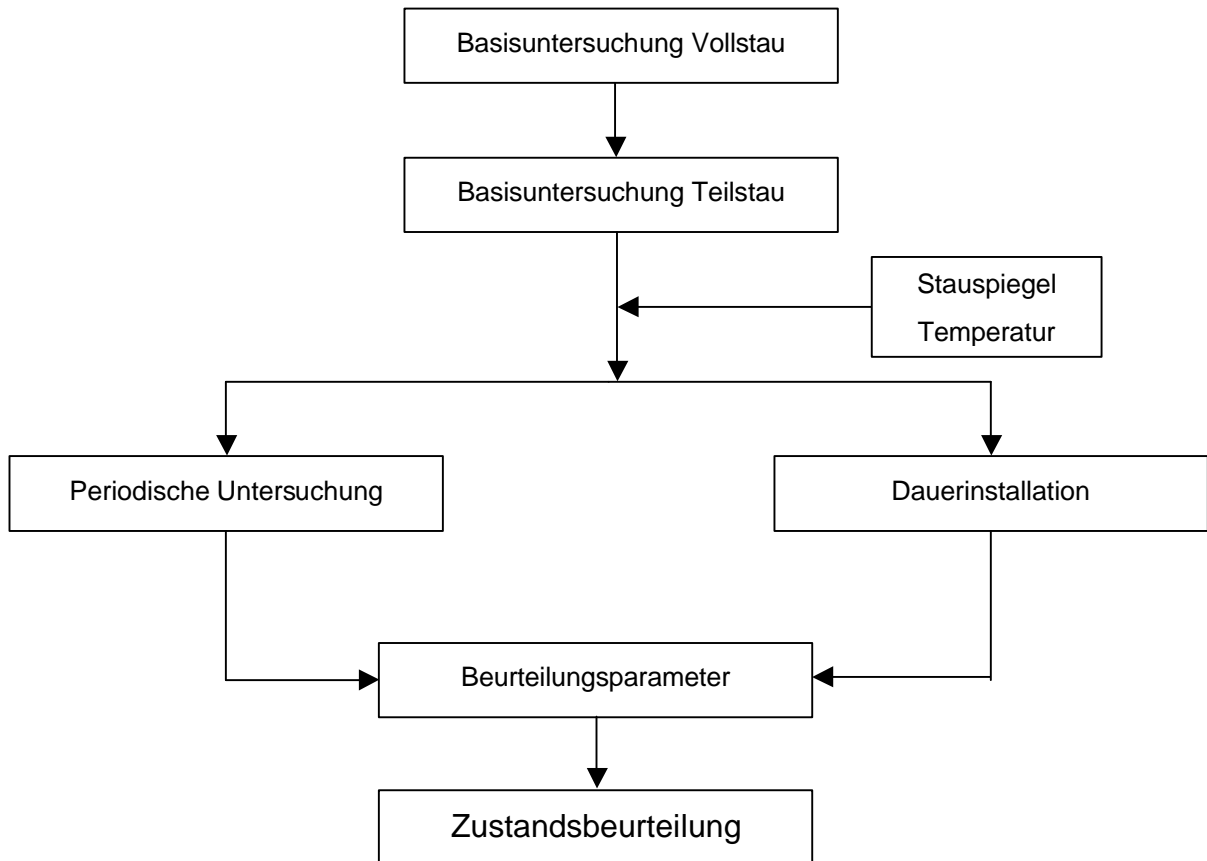


Bild 1. Überwachungskonzept für Talsperren

Auch hinsichtlich der Beurteilung gegenüber Erdbeben in seismisch aktiven Gebieten ist die messtechnische Ermittlung der modalen Parameter hervorragend geeignet. Wird das Gesamtsystem, bestehend aus Talsperre, Wasserkörper und Untergrund von einem Erdbeben angeregt dessen Frequenzen in der Nähe der Eigenfrequenzen des Sperrsystems liegen, so kommt es zu einer Verstärkung der Schwingungen (Resonanz), welche sehr schnell zu hohen Beanspruchungen des Bauwerkes führen können. Aus diesem Grund ist es wichtig, genaue Kenntnis über die Parameter Eigenfrequenz, Schwingungsformen und Dämpfungswerte des Systems zu erhalten. Damit ist es möglich, genaue mechanische Modelle für Sperrsysteme zu entwickeln.

3.1 Basisuntersuchung

Die Basisuntersuchung oder auch Nullmessung dient der genauen Bestimmung der modalen Parameter auf denen eine Beurteilung aufbaut. Belastungszustände (Stauspiegel), sowie klimatische Einflüsse (Temperatur) üben einen Einfluss auf die dynamische Charakteristik aus, daher sind der zugehörige Stauspiegel sowie die aktuelle Bauwerkstemperatur zu erfassen und gemeinsam mit den Messdaten zu beurteilen. Dieser Vorgang ist erforderlich, um gewöhnliche Veränderungen der modalen Parameter von außergewöhnlichen Änderungen (Schädigung) unterscheiden zu können. Eine Messung bei Vollstau sowie bei möglichst leerer Talsperre wird durchgeführt, um die „Ganglinie“ der Eigenfrequenz unter Last („added-mass“) zu erfassen.

Bei der Basismessung ist eine möglichst genaue Abdeckung des Bauwerkes mit Sensoren durchzuführen, um eine ausreichend große Datenbasis für die zukünftige Beurteilung aufzunehmen.



Bild 2. Beschleunigungsaufnehmer auf der Sperrenkrone

3.2 Periodische Messungen

Dabei werden in regelmäßigen Abständen Schwingungsmessungen durchgeführt (meist jährlich) und mit den Werten der Basismessung verglichen. Dabei kommt der Trenddarstellung besondere Bedeutung zu, wobei wieder eine Kompensation für den aktuellen Stauspiegel sowie die Bauwerkstemperatur durchzuführen ist. Zeigen sich in den Trendkarten außergewöhnliche Verschiebungen so können deren Ursachen genauer untersucht, sowie entsprechende Korrekturmaßnahmen ergriffen werden.

3.3 Permanente Überwachung (Brimos-Rekorder)

Wird bei einem sensiblen Bauwerk eine genaue Untersuchung erforderlich, so kann in einem oder mehreren charakteristischen Punkten ein dauerhaft installiertes Messsystem eingesetzt werden. Dieses System wurde von VCE entwickelt und zeichnet in frei wählbaren Intervallen Messdaten auf (z.B. täglich), die anschließend über ein Modem sehr rasch und einfach abgerufen werden können. Die Beurteilung der Daten erfolgt dabei sehr anschaulich über die Trenddarstellung.

Das System wurde unter der Voraussetzung entwickelt, dass auch die periodischen Messungen vom zuständigen Erhalter selbst durchgeführt werden können. Auf eine sehr einfache Bedienung des Gerätes sowie auf eine robuste Konzeption wurde großen Wert gelegt. Die Auswertung und Interpretation der Messdaten wird jedoch weiterhin von Experten durchgeführt.



Bild 3. Brimos-Recorder von VCE

3.4 Automatisches Warnsystem

Durch die Festlegung von kritischen Änderungen der modalen Parameter kann ein automatisches Warnsystem etabliert werden, das sehr frühzeitig Abweichungen im Sperrsystem aufzeigt und entsprechende Warnsignale liefert.

4. Beurteilungsparameter

4.1 Eigenfrequenzen

Führt man die aufgezeichneten Beschleunigungssignale aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich über, erhält man ein Antwortspektrum, dessen Energiespitzen bei den Eigenfrequenzen des Bauwerkes liegen. Die Transformation aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich erfolgt durch eine Fast-Fourier-Transformation (FFT), die auf Grundlage der diskreten Fourier-Transformation (DFT) entwickelt wurde und eine rasche numerische Spektralanalyse der gemessenen Beschleunigungen möglich macht. Für die Anwendung der FFT ist es lediglich erforderlich, dass der gemessene Datensatz 2^n Werte beinhaltet, wobei n eine natürliche Zahl ist. Die Rechenzeit wurde dadurch gegenüber der DFT erheblich reduziert. Entsprechende Glättungs- und Mittelungsalgorithmen wurden in der Auswertesoftware implementiert, um die Eigenfrequenzen des Bauwerkes klar identifizieren zu können.

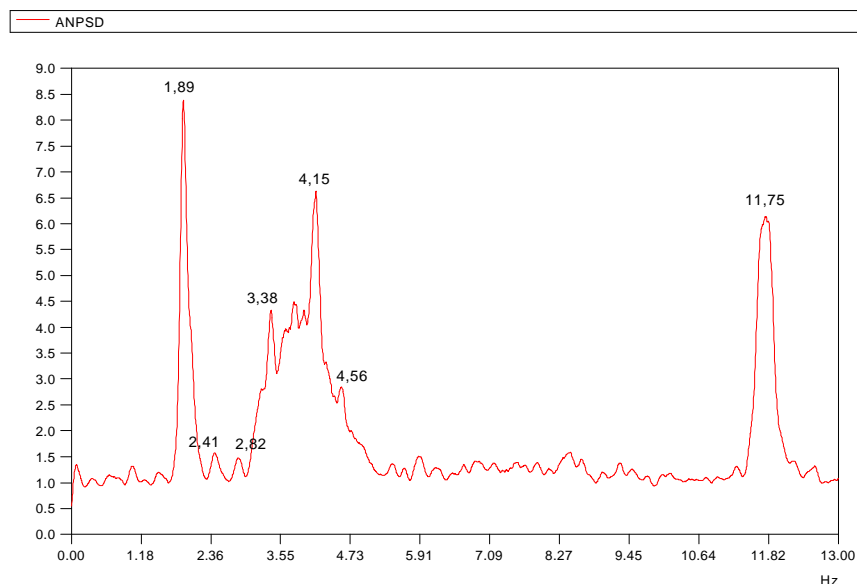


Bild 4. Frequenzspektrum der Sperre Schlegeis

4.2 Eigenformen

Die Eigenformen sind jene zu den Eigenfrequenzen korrespondierenden Bewegungen, aus denen sich die tatsächlichen Bauwerksschwingungen zusammensetzen. Sie sind neben den Eigenfrequenzen die zweite wesentliche Größe zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Struktur. In jedem Messpunkt werden die Gesamtschwingungen des Bauwerkes und somit auch die Schwingungsanteile der einzelnen Eigenformen erfasst. Grundsätzlich erfolgt die Beurteilung aus einer zweifachen Integration der Beschleunigungswerte, wodurch Schwingwege berechnet werden. Die zu einer bestimmten Eigenfrequenz gehörenden Schwingwege entsprechen damit der Eigenform des Bauwerkes.

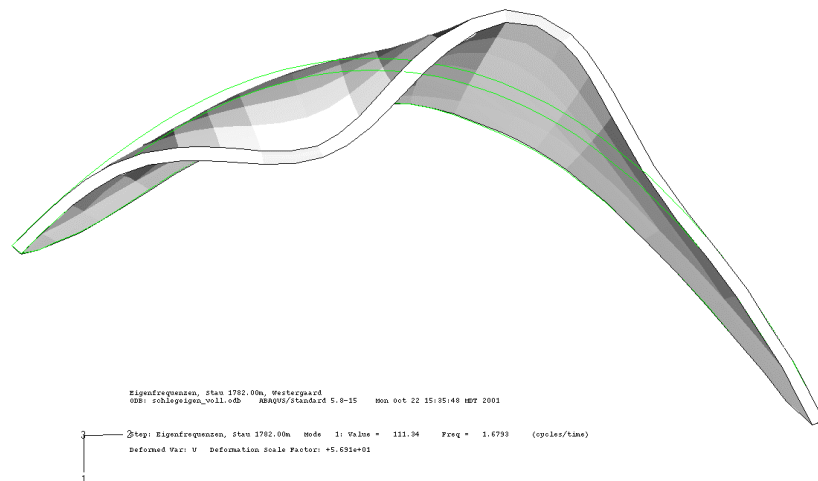


Bild 5. Erste Eigenform der Talsperre Schlegelis

4.3 Trendkarten

Als eine sehr wesentliche Entwicklung im Zusammenhang mit ambienten Messungen sind die Trendkarten anzusehen. Diese Karten stellen ein Signal im Frequenz-Zeitbereich dar, wobei aus Gründen der Anschaulichkeit eine zwei-dimensionale Flächendarstellung gewählt wurde. Die folgende Grafik zeigt die Erstellung der entsprechenden Trendkarten, wobei die Ergebnisse (Frequenzspektren) mehrerer Messungen ausgewertet, zusammengeschoben und von oben betrachtet werden.

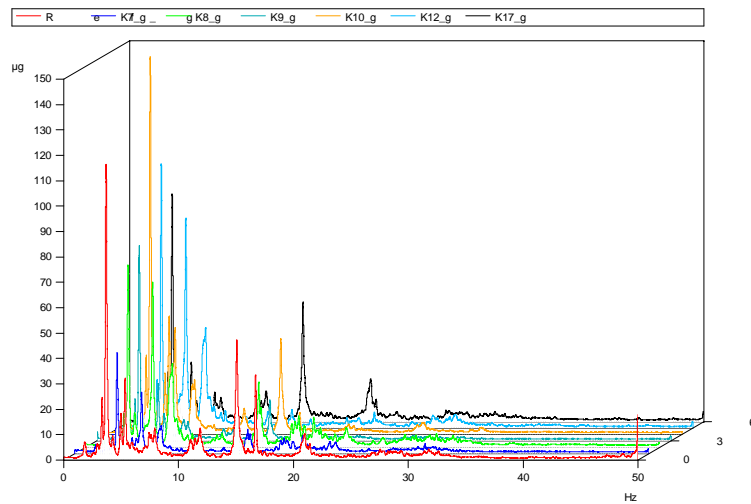


Bild 6. Entstehung der Trendkarten aus den Frequenzspektren

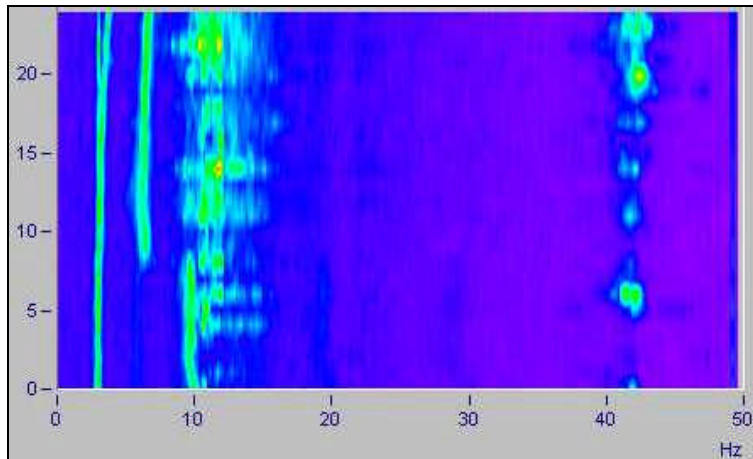


Bild 7. Trendkartendarstellung der Sperre Schlegeis

Um die einzelnen Frequenzspitzen unterscheiden zu können, ist eine Färbung der Karte erforderlich, wodurch der Energiegehalt der Schwingung und damit die zugehörige Intensität bestimmt werden können. Durch diese Art der Darstellung sind Veränderungen bereits in der Anfangsphase in den Frequenzspektren sichtbar. Anzumerken ist jedoch, dass die Grundfrequenzen mit ihren langwelligen Schwingungsformen gegenüber lokalen Schäden eher unempfindlich sind. Daher kommt der Beurteilung und Interpretation des gesamten gemessenen Frequenzspektrums größte Bedeutung zu.

5. Schlussfolgerungen

Die Besonderheit des hier gezeigten Systems liegt darin, dass durch eine Anpassung der Aufzeichnungsparameter auf die spezifischen Fragestellungen bei Talsperren im Vergleich zu früheren Versuchen mit ambienter Erregung bzw. erzwungener Erregung weit bessere Ergebnisse erzielt werden können. In Kombination mit der durch VCE entwickelten Software sind Aussagen über das Bauwerk möglich, die der Beurteilung und Erhaltung von Sperrbauwerken völlig neue Bereiche erschließen.

Der Vorteil der ambienten Messmethode im Gegensatz zur bisher schon mehrfach angewendeten erzwungenen Anregung (Forced Vibration [7, 8, 9]) ist der weitaus geringere Aufwand für die Durchführung der Messungen, da diese ohne aufwendige Geräte wie Schwingerreger und Stromaggregate auskommen, sowie die höhere Sensibilität der eingesetzten modernen Messtechnik. Die Untersuchungen an der Talsperre Schlegeis in Österreich zeigten deutlich, dass auch sehr massive Bauwerke unter ambienter Erregung eindeutige Ergebnisse liefern. Bei einem Vergleich zu Messungen die unter erzwungener Erregung durchgeführt wurden, zeigten sich die herausragenden Vorteile der ambienten Analyse hinsichtlich Aufwand und Informationsgehalt der Messdaten.

6. Literatur

1. www.vce.at
2. Geier, R.; Wenzel, H.; Pichler, D. 2001 „BRIMOS – Beurteilungsmethode für den Brückenbau“, Veröffentlichung für das österreichische Verkehrsministerium.
3. Bachmann, H., 1996 „Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines“, Birkhäuser Verlag, ETH Zürich.
4. Felber, A., „An Introduction to Ambient Vibration Testing – Course Manual“, EMPA Report-No. 155`715 Dübendorf.
5. Wenzel, H.; Geier, R, 2001 „Dynamic tests of real bridges till failure“, Symposium Health Monitoring and Retrofitting of Large Civil Engineering Structures, San Diego.
6. Lutz, H. 2002 „Dynamische Analyse von Bauwerken unter ambienter Anregung“, Diplomarbeit, TU-Wien
7. Riezinger, J. 1996 „Identifikation des dynamischen Verhaltens einer Talsperre bei unterschiedlichen Wasserständen im Speicher“. Dissertation, TU-Wien
8. Cantieni, R.; Wiberg, U.; Pietrzko, S.; Deger, Y., 1998 „Modal Investigation of a Dam“, 16th International Modal Analysis Conference, Santa Barbara
9. Cantieni, R.; Wiberg, U.; Pietrzko, S.; Deger, Y., 1999 „Modal Investigation of a Dam“, Fourth Conference of the European Association for Structural Dynamics, Prag

Dipl.-Ing. Roman Geier, Projektleiter bei VCE Holding GmbH., Diesterwegg. 1,
A-1140 Vienna, Austria – geier@vce.at

Dipl.-Ing. Heinz Lutz, Projektbearbeiter bei VCE Holding GmbH., Diesterwegg. 1,
A-1140 Vienna, Austria – lutz@vce.at