

OPTIMALE POSITIONIERUNG VON MESSEINRICHTUNGEN AN STAUMAUERN ZUR BAUWERKSÜBERWACHUNG

Dr. rer. nat. Tom Lahmer¹, Prof. Dr.-Ing. Carsten Könke², Dr.-Ing. Volker Bettzieche³

¹ DFG - Graduiertenkolleg1462, Bauhaus-Universität Weimar

² Institut für Strukturmechanik, Bauhaus-Universität Weimar

³ Ruhrverband Essen, Abteilung Talsperrenüberwachung und Geotechnik

Kurzfassung:

Der sichere Betrieb von Talsperren bedarf einer zuverlässigen Überwachung, um Änderungen des Tragverhaltens der Absperrbauwerke, die beispielsweise durch akkumulierende Schädigungen verursacht sein können, frühestmöglich zu erkennen.

Schädigungen einer Staumauer können beispielsweise durch Alterungsprozesse, wechselnde Lasten infolge des jahreszeitlichen Temperaturgangs oder der Stauhöhenänderungen sowie infolge der Durchströmungsvorgänge in der Staumauer oder im Untergrund verursacht werden. Die Schädigungen führen zu Veränderungen im Strömungs-, Verschiebungs- und Temperaturfeld von Mauerkörper und Untergrund. Werden diese Veränderungen mittels geeignet platzierter Messeinrichtungen detektiert, so können unter Anwendung von mathematischen Inversionsverfahren Aussagen über Lage und Größe der Schädigungen getroffen werden.

Die Präzision und Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse hängt stark von der Art der Messungen, deren Position und deren Messgenauigkeit ab. Eine simulationsbasierte Planungen von Bauwerksüberwachungen beinhaltet die Aufgabe die Sensoren so zu platzieren, dass mögliche Schädigungen mit einer maximalen Wahrscheinlichkeit richtig detektiert werden.

Die Korrelation der einzelnen Messfelder bietet dabei die Möglichkeit zu verbesserten Aussagen über Schädigungszonen zu kommen.

1. Problemstellung

Bau, Unterhaltung und Betrieb von Talsperren sind in Deutschland gesetzlich geregelt. Wegen der besonderen Bedeutung dieser wasserbaulichen Anlagen fordern die Landeswassergesetze eine Überwachung von Talsperren nach dem Stand der Technik. Technische Regelungen hierzu finden sich in der DIN 19700-11 [1] und im neuen DWA-Merkblatt M 514 „Bauwerksüberwachung an Talsperren“ [2]. Merkblatt M 514 gibt Empfehlungen für die Ausstattung von Staumauern und Staudämmen mit Messsystemen entsprechend ihrer verschiedenen Bauweisen, fordert jedoch die Anpassung dieser Empfehlungen an die spezifischen Anforderungen des Absperrbauwerks. Zur Wahl der erforderlichen Anzahl und Position der Messgeber werden grundsätzliche Empfehlungen gegeben, wie z.B. in Tabelle 1 für die Überwachung der Verschiebungen einer Bruchstein-Staumauer aufgeführt.

Bei der Wahl der Messausstattung für ein konkretes Absperrbauwerk, zum Beispiel eine Bruchsteinstaumauer steht der planende Ingenieur nun vor der Frage, wie er diese Empfehlungen konkretisiert.

Messgröße	Messmethode/ Messinstrumente	Zahl der Messstellen	Häufigkeit der Messungen
Horizontalverschiebungen der Mauerkrone	Pendellot (in Kopplung mit Schwimmlot oder Extensometer)	2	wöchentlich
Horizontalverschiebungen der Mauerkrone	geometrisches Alignement und/oder geodätische Lagebestimmung	3	vierteljährlich halbjährlich
Horizontalverschiebungen der Mauerluftseite	geodätische Lagebestimmung	mind. 3 Profile (Mauermitte, rechter und linker Mauerflügel)	halbjährlich
Horizontalverschiebung im Gründungsbereich	Schwimmlot (ggf. mit selbstzentrierender Sonde) oder Extensometer oder Inklinometer	2	wöchentlich
Vertikalverschiebung	geometrisches Präzisionsnivellement	3	halbjährlich

Tabelle 1: Empfehlungen des MB 514 zur Überwachung der Verschiebungen einer Bruchstein-Staumauer [2].

Allgemein greift er dabei auf seine Erfahrung zurück und orientiert sich an der Ausrüstung ähnlicher Staumauern. Nach [3] berücksichtigt er dabei mögliche Schadensmechanismen, die er mit Hilfe der Messtechnik so frühzeitig erkennen will, dass ein Eingreifen noch vor Beginn einer kritischen Entwicklung möglich ist.



Bild 1: Während eines Erdbebens 1999 brach die Shih-Kang Staumauer in Taiwan durch Verschiebungen der Gründung entlang einer Störungszone (Bildquelle: <http://gees.usc.edu>).

Typische Schadensmechanismen an Bruchsteinstaumauern sind z.B.

- Verschiebungen im Gründungsfels durch Veränderungen an Störungszonen (siehe Bild 1)
- Hebungen der Mauerkrone durch Auffrieren im Mauerkörper
- Auflösung des Mauermörtels und Zunahme der Durchsickerung
- Versinterung von Dränagesystemen (siehe Bild 2)
- Zunahme des Porenwasserdrucks / Auftriebs
- Kippen der Staumauer durch Lastumlagerung in Folge des Auftriebs



Bild 2: Eisfahnen an einer Bruchstein-Staumauer zeigen die unplanmäßige Durchsickerung (Bildquelle: Ruhrverband).

2. Fürwiggestaumauer

Die in den Jahren 1902 bis 1904 errichtete Fürwiggetalssperre gehört zu den ersten Talsperren, die nach Plänen von Prof. Intze im Einzugsgebiet der Ruhr errichtet wurden. Mit einem Stauinhalt von 1,67 hm³ gehört sie nach heutigem Maßstab zu den kleinen Talsperren. Für das Mauerwerk der in Talmitte 29 m hohen Gewichtsstaumauer wurden Grauwackesteine aus einem benachbarten Steinbruch mit Kalk-Trassmörtel verwendet.

Wie viele alte 'Intze-Mauern' musste auch die Fürwiggestaumauer nach 100 Jahren Betriebszeit saniert werden. Hierzu wurde mit Hilfe von Sprengungen ein Kontrollgang in den Mauerkörper vorgetrieben und von diesem aus ein Dränagesystem eingerichtet (s. Bild 4). Nach erfolgreichem Probestau nahm die Talsperre 2008 wieder ihren Regelbetrieb auf.

Das vor der Sanierung vorhandene Mess- und Kontrollsystem der Fürwiggetalssperre entsprach bereits im Wesentlichen dem Stand der Technik. Durch die Sanierungsmaßnahmen wurde jedoch ein Teil dieser Mess- und Kontrolleinrichtungen unbrauchbar und war dementsprechend wieder herzustellen. Zudem wurde das System um zusätzliche Einrichtungen erweitert. Einen Überblick über die Messeinrichtungen der Bauwerksüberwachung gibt Tabelle 2.



Bild 3: Ausschnitt aus der Originalzeichnung zur Fürwiggestaumauer (vormals als Obere Versetalsperre bezeichnet) nach Plänen von Prof. Intze (1904) (Bildquelle: Ruhrverband).

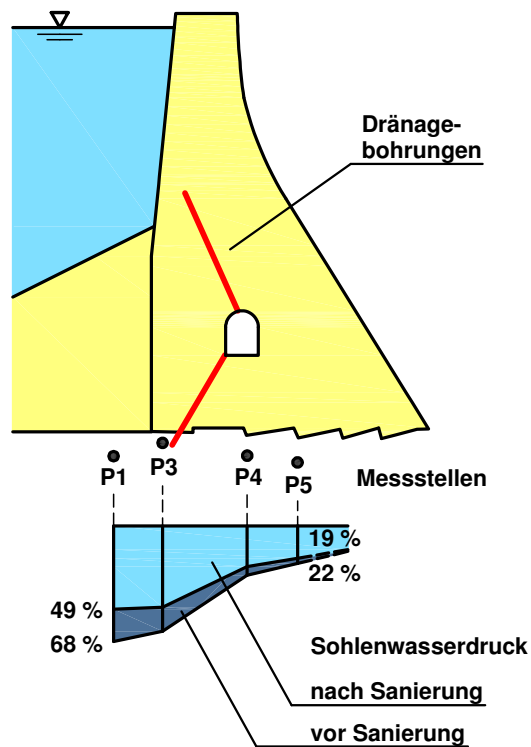


Bild 4: Querschnitt Fürwiggestaumauer mit Kontrollgang und Drainagen (2008) (Bildquelle: Ruhrverband).

Messgröße	Messmethode / Messgerät	Zahl der Messstellen
Horizontale Verschiebungen	Gewichtslot radial	1
	Gewichtslot tangential	1
	Schwimmlot	1
	geodät.: Mauerluftseite	14
	geodät.: Krone	1
Setzungen	Feinnivellement	4
Sickerwasser	Messgerinne/ Messgefäß	4
Sohlenwasserdruck	Manometer / Lichtlot	13
Spannungen	Spannungsgeber	4
Porenwasserdruck	Porendruckgeber	4
Grundwassermessstellen	Offene Bohrungen	7
Temperaturen		
- Bauwerk	Temperaturfühler	14
- Luft	Temperaturfühler	1
- Wasser	Temperaturfühler	2
Stauhöhe	Drehmelder	1

Tabelle 2: Messeinrichtungen der Fürwiggestaumauer

3. Simulationsbasierte Untersuchungen der Fürwiggestaumauer

3.1 Hydro-Mechanische Finite Elemente Simulation

Um die sich in der Staumauer abspielenden Effekte besser zu verstehen, kann man sich einer numerischen Simulation der auftretenden gekoppelten Strömungsvorgänge und Spannungsdehnungsbeziehungen bedienen. Gleichzeitig lassen sich aus den Simulationsmodellen durch Verfahren der Systemidentifikation Informationen zum aktuellen Tragwerkszustand aus Messwerten ermitteln.

Als Bilanzgleichungen sind die Massenerhaltungsgleichung für das Wasser sowie das Momentengleichgewicht auf mechanischer Seite zu nennen. Die Bilanzgleichungen sind um die für poröse Medien typischen Konstitutivbeziehungen erweitert. Darunter befinden sich auf hydraulischer Seite das Gesetz von Darcy, welches besagt, dass der hydraulische Fluss proportional zum Gradienten des Porenwasserdrucks ist. Zudem wird für die präzise Beschreibung der Staumauer die Theorie teilgesättigter Materialien zu Grunde gelegt. Entsprechend wird der Grad der Sättigung, der sich als Funktion der Saugspannung ergibt, berücksichtigt.

Ferner berechnet sich die hydraulische Durchlässigkeit nunmehr aus dem Produkt der Permeabilität k (m/s) und der relativen Permeabilität k_{rel} (dimensionslos). Die relative Permeabilität ist dabei die Durchlässigkeit eines Materials bezogen auf dessen Maximalwert 1 bei vollständiger Sättigung, siehe Abbildung 5.

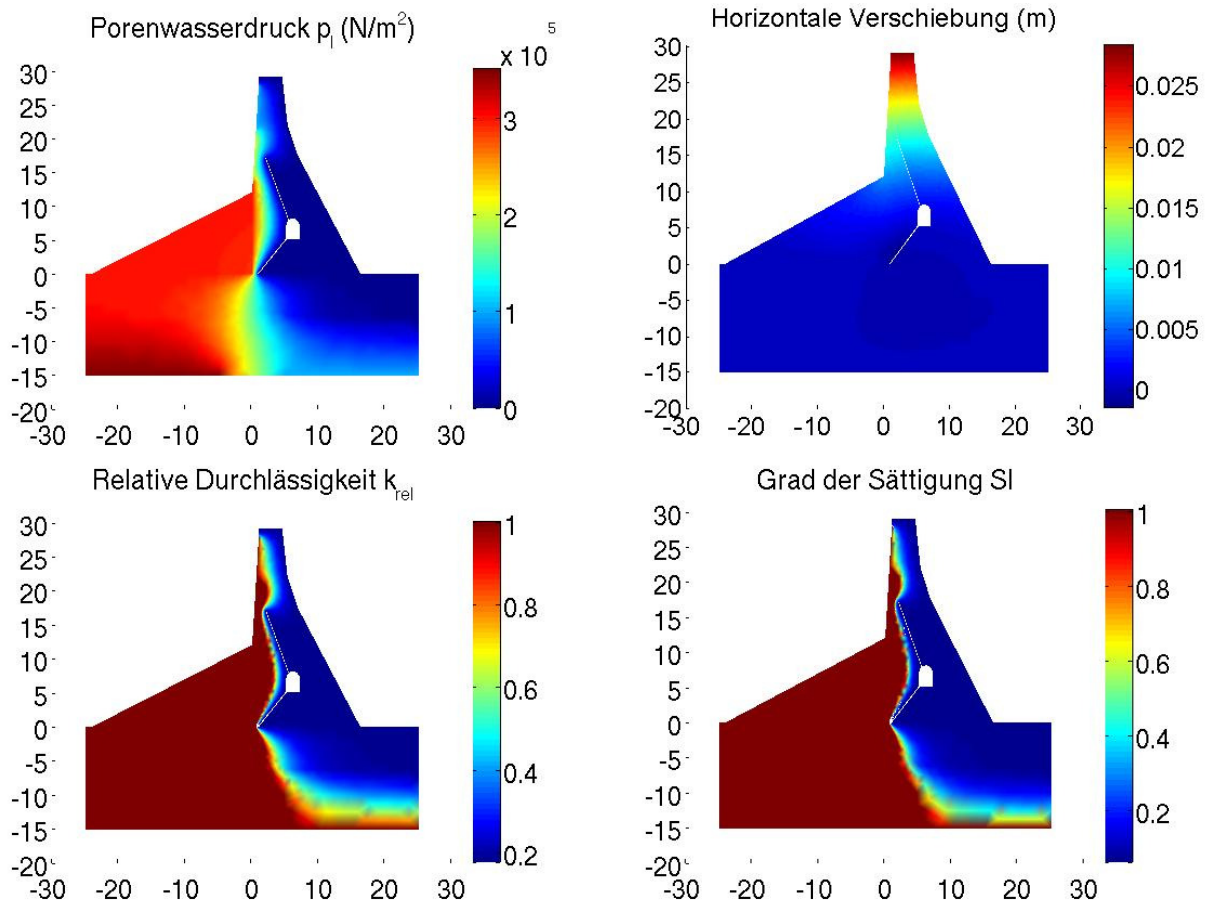


Bild 5: Simulationsergebnisse einer ungeschädigten Staumauer. Dargestellt sind die Porenwasserdruckverteilung, die Horizontalverschiebung (obere Bilder), sowie die relative Durchlässigkeit und der Grad der Sättigung. Deutlich ist der Einfluss der Drainagen zur Entwässerung des Bauwerks zu erkennen.

Auf der mechanischen Seite wird unter der Annahme, dass keine plastischen Verformungen auftreten, ein lineares Stoffgesetz angewandt, welches die mechanischen Spannungen mit den Dehnungen verknüpft. In dem angewendeten Simulationsmodell wird die Fürwiggestaumauer im ebenen Dehnungszustand berechnet.

Die Kopplung zwischen mechanischen und hydraulischen Größen wird einerseits über das Konzept der Effektivspannung realisiert, welches die Porenwasserdrücke auf die Normalkomponenten im Spannungstensor abbildet, sowie über den Term der volumetrischen Dehnungsrate in den hydraulischen Bilanzgleichungen. Details zur numerischen Berechnung von gekoppelten hydro-mechanischen Systemen werden in [4] gegeben, deren Anwendung auf Staumauern und inverse Formulierung werden in [5] und [6] diskutiert. Für die hier dargestellten Berechnungen wird eine isothermale Beschreibung gewählt. Die Erweiterung der Theorie für temperaturabhängige Formulierungen wird in [4] diskutiert.

Zusammenfassend führt die Beschreibung der Strömungs- und Spannungsvorgänge in Staumauern zu einem gekoppelten System nichtlinearer partieller instationärer Differentialgleichungen, die mittels der Finiten Elemente Methode approximativ gelöst werden.

Entsprechend der Einstauhöhe werden dem numerischen Modell Potentialrandbedingungen an der Wasserseite der Staumauer vorgeschrieben.

Entlang der Drainagen und der Luftseite der Mauer werden Sickerrandbedingungen vorgegeben. Mechanische Deformationen sind entlang des Randes des simulierten Untergrundes fixiert.

Eine Schädigung im Bauwerk, die zu einer lokalen Veränderung der maßgeblichen Materialkennwerten führt, wird in dem numerischen Modell über heterogene Parameterverteilungen realisiert, einem so genannten verschmierten Riss. So werden im Bereich einer Schädigung eine erhöhte Durchlässigkeit sowie eine verminderte mechanische Steifigkeit angenommen.

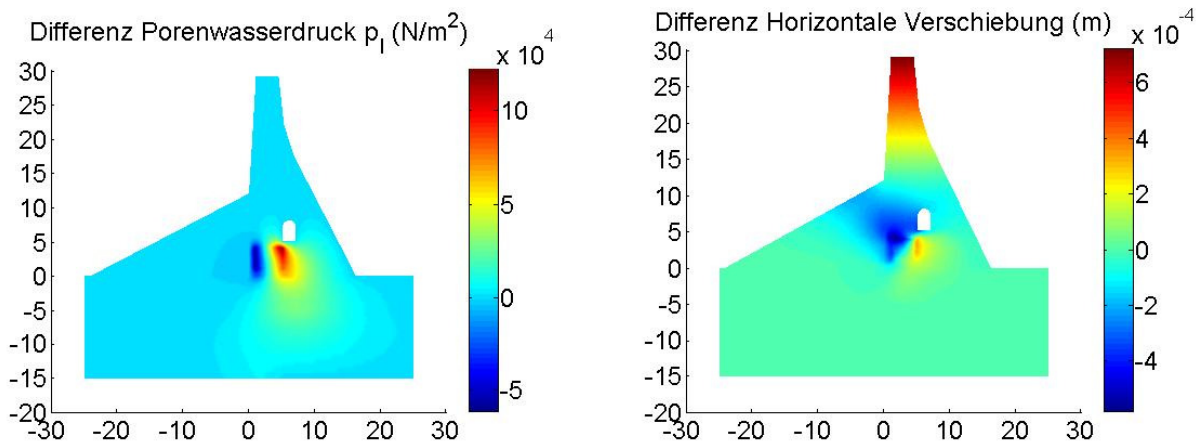


Bild 6: Differenzen der berechneten Porenwasserdruckverteilungen und Horizontalverschiebungen zwischen einem ungeschädigten und geschädigten Zustand der Talsperre.

Die Abbildungen in Bild 6 zeigen die Differenzen der Lösungen zwischen Modellen mit Schädigung (heterogene Materialparameter) und im schadensfreien Zustand (homogene Materialparameter). Die Schädigung ist links unterhalb des Kontrollgangs angenommen und dem Bild 7 zu entnehmen. Messungen in den Gebieten mit betragsmäßig großen Differenzen der Lösungen weisen eine hohe Sensitivität der Messungen bzgl. der Schädigungsparameter auf. Deutlich ist zu erkennen, dass verschiedene Zonen unterschiedlich sensitiv bezüglich der betrachteten physikalischen Größen sind.

3.2 Schädigungsidentifikationen

Die an ausgewählten Punkten beobachteten Strömungs- und Spannungsverhältnisse einer geschädigten Staumauer können nun mit denen einer ungeschädigten Mauer verglichen werden. Die Diskrepanz zwischen diesen Werten, darunter Porenwasserdruck und mechanische Auslenkung, dienen in einer inversen Rechnung als Eingangsgrößen. Ziel der Inversion ist es, aus den beobachteten Größen, die Parameterverteilungen zu detektieren.

Da jedoch solche Messungen nur an wenigen Punkten vorliegen, und sich zudem Messfehler einstellen, gehören Inversionsrechnungen in der Mathematik zu den so genannten schlecht gestellten Problemen und bedürfen geeigneter Regularisierungsmethoden, um sie stabil lösen zu können [7].

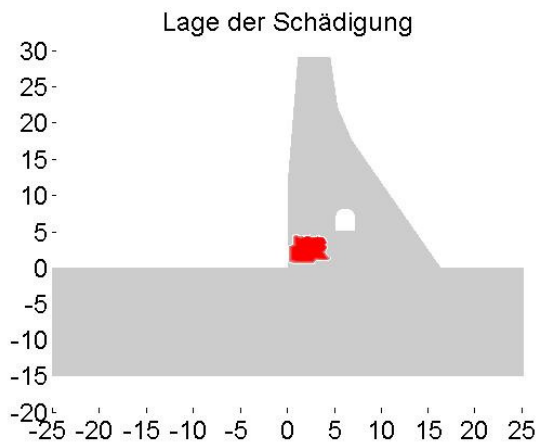


Bild 7: Lage der Schädigung links unterhalb des Kontrollgangs.

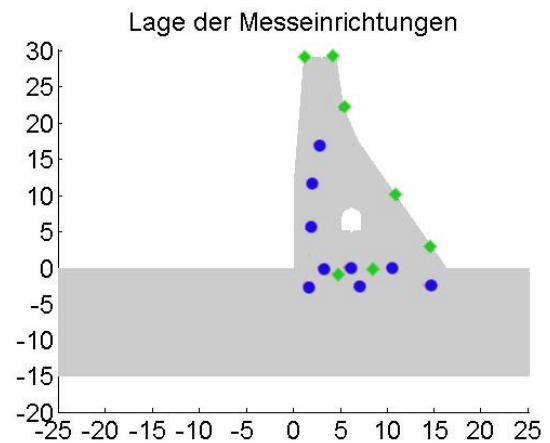


Bild 8: Lage der Messeinrichtungen für die Schadensidentifikation im numerischen Beispiel: Die blauen Punkte repräsentieren die Porenwasserdruckmessungen, die grünen Rauten entsprechen den mechanischen Verschiebungen.

Leider ist bei den inversen Rechnungen nicht garantiert, die wahre Lösung zu finden, da deren Existenz und Eindeutigkeit nicht gewährleistet sind. In der Situation eines Mehrfeldproblems soll sich daher der inhärenten Korrelation der maßgeblichen Parameter bedient werden und durch eine gekoppelte Betrachtung von hydraulischen und mechanischen Messungen auf Schädigungen geschlossen werden.

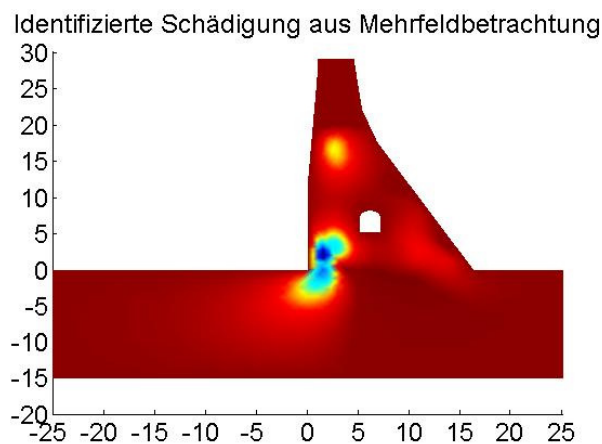


Bild 9: Identifizierte Schädigung aus einer gemeinsamen Betrachtung von hydraulischen und mechanischen Messungen.

Dies beinhaltet die Vorteile, dass einerseits eine höhere Anzahl von Messungen vorhanden ist, zum anderen aber durch die Korrelation der maßgeblichen Parameter beispielsweise detektierte Veränderungen der mechanischen Konstitutivparameter mit denen der hydraulischen verglichen werden können. Bei deren Übereinstimmung kann die Aussage zu Lage und Größe einer lokalen Schädigung demzufolge mit einer höheren Verlässlichkeit getroffen werden, als wenn die einzelnen Messfelder getrennt voneinander betrachtet werden. Da nur Schädigungen im Bauwerk sowie starke Klüftungen im Bereich des Untergrundes zu identifizieren sind, ist der Intze-Keil in den inversen Rechnungen nicht mehr Bestandteil des numerischen Modells.

Das Ergebnis einer solchen Inversionsrechnung ist in Bild 9 dargestellt, wobei sowohl mechanische als auch hydraulische Größen berücksichtigt werden. Um die Effizienz der Methode bei der Betrachtung eines Mehrfeldproblems zu zeigen, wurde die Rechnung wiederholt, nun aber einerseits nur mit mechanischen und andererseits nur mit hydraulischen Messungen. Die vergleichsweise weniger präzisen (und im Falle reiner mechanischer Messungen nicht eindeutigen) Ergebnisse sind in Bild 10 gezeigt.

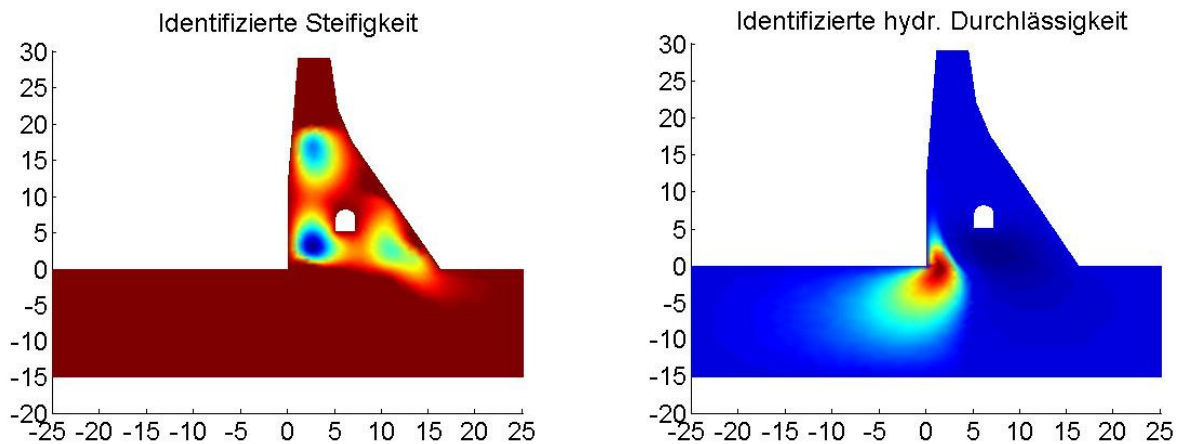


Bild 10: Identifikationsergebnisse mit dem gleichen Algorithmus, wobei einerseits nur die Steifigkeit aus mechanische Messungen identifiziert wurde (linkes Bild) und andererseits nur die hydraulische Durchlässigkeit aus Messungen der Porenwasserdruckverteilung (rechtes Bild).

3.3 Optimale Positionierungen der Messeinrichtungen

Die für Talsperrenbetreiber wichtige Beantwortung der Frage, wo die Messeinrichtungen zu positionieren sind, um kritische lokale Schädigungen der Bauwerke rechtzeitig zu erkennen, kann mit Hilfe der numerischen Simulation unterstützt werden.

Die mathematische Formulierung dieser Frage lautet, die Wahrscheinlichkeit zu maximieren, eine Schädigung in kritischen Bereichen zu erkennen. Dazu werden in dem numerischen Beispiel verschiedene Anordnungen von Messaufnehmern betrachtet. Für jede dieser Anordnungen wird nun ein inverses Verfahren gestartet, welches die Schädigungen identifiziert. Da in einer realen Situation, Lage und Größe der Schädigungen unbekannt sind, wird die inverse Rechnung für verschiedene Positionen und Ausprägungen der Schädigungen wiederholt. Über einen Vergleich der Ergebnisse der Identifizierungen mit den im synthetischen Beispiel bekannten und vorgebenden Schädigungen, kann die Qualität der Inversion bestimmt werden. Dies erlaubt die Konstellation von Messaufnehmern auszuwählen, die am vertrauensvollsten die Erkennung von potentiellen, in der Realität jedoch unbekanntem, Schädigungen ermöglicht.

Über Nebenbedingungen wird die Anzahl der einzusetzenden Sensoren beschränkt, da die triviale Lösung einer optimalen Versuchsplanung eine flächendeckende Überwachung wäre.

Des Weiteren werden die Bereiche, in denen Sensoren angebracht werden können, so beschränkt, dass diese bautechnisch realisierbar sind.

Die Lage der Messeinrichtungen, wie sie im Bild 8 eingezeichnet sind, stammen von so einem Vorgehen. Die Positionen der geodätischen Lagebestimmungen an der

Luftseite und Krone des Bauwerks stimmen recht gut mit den Vorschlägen des DWA-Regelwerks [2] überein. Die Messung der Verschiebung in der Gründungsfuge ist mit zweistufigen Extensometern möglich.

Bezüglich der Anzahl der Porenwasserdruckaufnehmer sind laut der numerischen Rechnung mehr Messaufnehmer seitlich und oberhalb des Kontrollgangs zu installieren als wie es in [2] für Bruchsteinmauern angegeben ist.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Fälle von Schädigungen, deren Ursachen und die optimale Überwachungen von Staumauern wurden diskutiert. Die durchgeführten numerischen Rechnungen zeigen, dass mit den bestehenden Überwachungen Schädigungen an Staumauern gut detektiert werden können. Die Qualität der Schädigungsidentifizierung basiert dabei wesentlich auf einer multiphysikalischen Betrachtung der einzelnen Messfelder sowie der Nutzung der Korrelationsinformationen zwischen den verschiedenen Messfeldern. Anwendung. Ein Vergleich der Anordnung der Messaufnehmer in Bild 8 mit den Differenzen der physikalischen Felder in Bild 6 zeigt, dass insbesondere die in [2] vorgeschlagenen Positionen der Messaufnehmer in den sensitiven Bereichen der maßgeblichen physikalischen Felder bezüglich einer kritischen Schädigung am wasserseitigen Mauerfuß liegen. Für eine Detektion von Schädigungen im oberen Bereich der Staumauern wird entsprechend der numerischen Rechnung eine höhere Anzahl von hydraulischen Messaufnehmern vorgeschlagen. Die technische Machbarkeit eines nachträglichen Einbaus an dieser Stelle nahe der wasserseitigen Maueroberfläche wäre noch zu untersuchen.

Literaturverzeichnis:

- [1] DIN: DIN 19700-11: Stauanlagen – Teil 11: Talsperren; Beuth-Verlag; Berlin; Juli 2004.
- [2] DWA: Merkblatt M514; Bauwerksüberwachung an Talsperren - Gelbdruck, DWA, Hennef, Dezember 2008.
- [3] Bettzieche, V.: Empfehlungen für die Ausstattung von Staudämmen und Staumauern - Einführung in die Kapitel 6 und 7 des DWA-Merkblatts 514; DWA-Seminar „Bauwerksüberwachung von Talsperren“; Erfurt; 12. November 2008; <http://www.talsperren.info/assets/applets/mb514.pdf>
- [4] Lewis, R. and Schrefler, B.A.: The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media, Wiley, J. 1998.
- [5] Lahmer, T.: Hydro-Mechanical Coupled Field System Identification - Application to Water Reservoirs, 18th Int. Conf. on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering, K. Gürlebeck and C. Könke (eds.), Weimar, Germany, July 2009.
- [6] Lahmer, T. Crack identification in hydro-mechanical systems with applications to gravity water dams, Inverse Problems In Science & Engineering, accepted 2010.
- [7] Engl, H. and Hanke, M. and Neubauer, A.: Regularization of Inverse Problems. Verlag : Springer Holland, 2000.