

Gekoppelte experimentelle und numerische Analyse von Staumauern mittels 3-dimensionaler Mehrphasen- und Mehrfeldmodelle

Der Artikel diskutiert Möglichkeiten, mittels gekoppelter Modellierung und Monitoring das physikalische Verhalten von Staumauern umfassender zu analysieren. Das in einem früheren Stadium erstellte und kalibrierte Modell wird mit den Belastungen des realen Bauwerks in einem späteren und längeren Zeitraum gerechnet und kann daher als digitaler Zwilling erachtet werden. Dieser kann genutzt werden, um im Falle von zu großer Diskrepanz zwischen Modell- und Strukturantwort Hinweise auf strukturelle Änderungen zu liefern.

Tom Lahmer, Long Nguyen-Tuan und Volker Bettzieche

1 Einleitung

Viele Staumauern wurden am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts gebaut. Nach mehr als hundert Jahren des Betriebs haben sich möglicherweise die strukturellen Eigenschaften der Bauwerke verändert. Gründe können chemische Effekte, Rissbildung oder innere Erosion sein. Generell ist davon auszugehen, dass sich die Materialeigenschaften der Staumauern zumindest lokal verändert haben. Diese Änderungen können auf das physikalische Verhalten der Bauwerke Einfluss haben, was sich z. B. in einer erhöhten Durchsickerung oder einer stärkeren Deformation in Folge von mechanischen oder thermischen Lasten äußert.

Für den sicheren Betrieb von Stauanlagen ist eine Überprüfung des physikalischen Verhaltens der Staumauern in definierten Zeitabständen durchzuführen (Monitoring). Dies geschieht in der Regel durch das Aufzeichnen von physikalischen Größen

mit geeigneter Sensorik und deren manueller Prüfung bezüglich unerwarteter Strukturantworten. Insbesondere wird das Verhalten mit Messungen aus vorherigen Zeiträumen verglichen, ohne unbedingt sämtliche physikalischen Interaktionen und geänderte Randbedingungen in Betracht zu ziehen.

Dieses klassische Vorgehen wird in diesem Beitrag um eine Kopplung mit einer numerischen Analyse der Staumauer erweitert. Dazu wird die Geometrie der Staumauer der Fürwiggestalsperre in ein 3-dimensionales Finite-Elemente-Modell überführt (**Bild 1**). Der getätigten Analyse liegen zweiphasige thermo-hydro-mechanische Beziehungen zu Grunde, die es erlauben, sämtliche physikalischen Effekte und deren Interaktionen möglichst präzise zu erfassen [1] – [5]. Das Modell wird über die gemessenen äußeren Bedingungen, wie Stauhöhe und jahreszeitlich variierende Temperaturen, gesteuert (**Bild 2**). Die transiente Analyse des Finiten-Elemente-Modells erlaubt dabei die Größen, wie Verschiebungen, Porenwasserdrücke, Sicker-

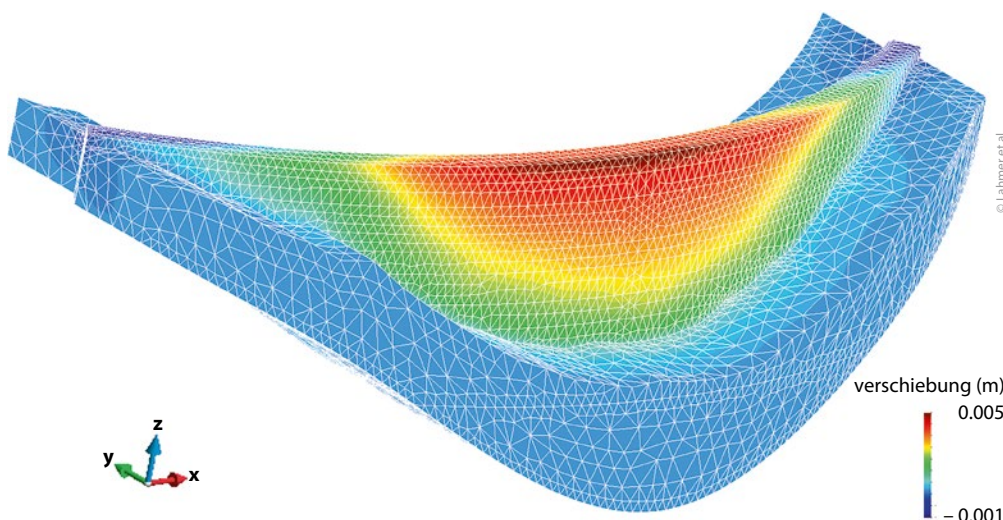


Bild 1: Geometrie und Verschiebung der Fürwiggestaumauer, Simulation des 12.01.2015

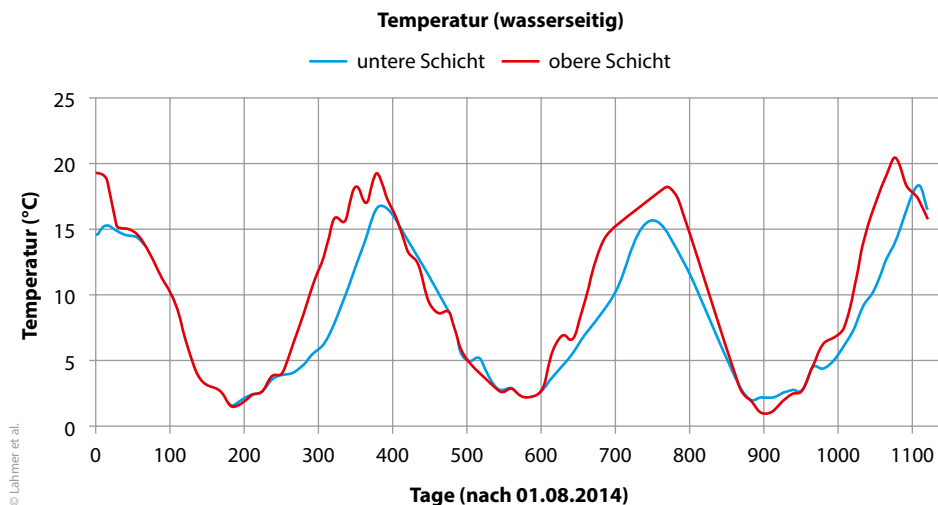


Bild 2: Gemessene Temperaturen für zwei verschiedene Wasserschichten über den betrachteten Zeitraum

wassermengen und Temperaturen, sowohl am Rand als auch in der Struktur für einen beliebig ausgewählten Zeitraum zu berechnen. Das Modell wurde einer früheren Studie [3], [4] entnommen, bei der die Modellkalibrierung und Validierung anhand gemessener Daten des Probestaus 2007 [6] im Vordergrund standen. Eine Kopie der realen Struktur liegt somit als numerisches Modell vor, welche kontinuierlich mit neuen Randbedingungen evaluiert werden kann. Es kann also von einem digitalen Zwilling gesprochen werden, mit dem es möglich ist, Messdaten auf ihre Plausibilität zu prüfen.

Würden für einzelne oder mehrere Messstellen oder Regionen sichtbare Unterschiede auftreten, so sind sowohl Modellannahmen als auch mögliche Schwachstellen in der Art der Instrumentierung zu prüfen. Sind hier jeweils Fehlerquellen definitiv auszuschließen, so kann die Diskrepanz zwischen gemessenen und vorhergesagten Größen auf eine strukturelle Schwächung schließen lassen, die eingehender untersucht werden muss. Auch hier bei der Detektion einer Schwachstelle stehen Methoden bereit, über eine inverse Analyse die Struktur tiefergehend zu analysieren [7].

2 Modellierung

Im Allgemeinen haben Staumauern drei Hauptbeanspruchungen zu tragen:

- Eigengewicht,
- Belastung durch den Wasserdruck der Talsperre und Porenwasserdruck innerhalb der Struktur sowie

Kompakt

- Mit gekoppelten Mehrphasen- und Mehrfeldmodellen kann das physikalische Verhalten von Staumauern präzise abgebildet werden.
- Ein Vergleich mit aktuellen Messungen unter Berücksichtigung der entsprechenden Lasten im Modell erlaubt dann das Verhalten der Mauer auf Plausibilität zu prüfen.

- Mechanische Spannungen induziert durch thermische Ausdehnung.

Deshalb müssen die Beziehungen zwischen der Wärmeleitung, dem Wassertransport in teilgesättigten Materialien und die Kraft-Verformungs-Relation in numerischen Simulationen der Staumauern gleichzeitig berücksichtigt werden. Aufgrund sich ändernder Querschnitte und Lastabtragungen in den Fels sind 3-D-Geometrien zu berücksichtigen.

Gekoppelte numerische Simulationen der Durchströmung mit Hilfe der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in gesättigten porösen Materialien, die an den Staumauern angewandt werden, werden in Wang et al. [5] eingeführt. Die numerische Simulationen unter Berücksichtigung von Rissen oder Schäden wird z. B. in Pinyol et al. [1] und Demisch und Bettzieche [7] diskutiert. Die vollständige Modellierung der Wasserinfiltration und Verformung einer Staumauer unter Temperatureinwirkungen werden allerdings in der Literatur erstmals in Nguyen-Tuan [3] und Lahmer et al. [4] berücksichtigt.

2.1 Bilanzgleichungen, Konstitutivgesetze

Die thermo-hydro-mechanischen (THM) Probleme werden durch ein System gekoppelter Bilanz- und Masseerhaltungsgleichungen formuliert (für Details s. [1], [2] oder [8]).

Es werden dabei folgende Bilanzgleichungen berücksichtigt

- Massenerhalt des Fluids (flüssige und gasförmige Phase),
 - Mechanisches Momentengleichgewicht,
 - Thermische Energiebilanz.
- Das Ziel ist es, die physikalischen Beziehungen in Termen der primären Unbekannten zu formulieren. Dafür müssen die abhängigen Variablen den primären Unbekannten zugeordnet werden. Die THM-Analyse inkludiert dabei eine Reihe komplexer, teilweise auch nicht-linearer Zusammenhänge, darunter,
- Gesetz nach Darcy zur Beschreibung des advektiven Flusses,
 - Gesetz nach Fick zur Beschreibung des nicht-advektiven Flusses,
 - Gesetz nach Fourier für die konduktive Wärmeleitung sowie Modelle zur Berechnung der Wassersättigung aus den Porenwasserdrücken. Mechanisch wird linear-elastisches Verhalten angenommen unter den Effekten der thermischen

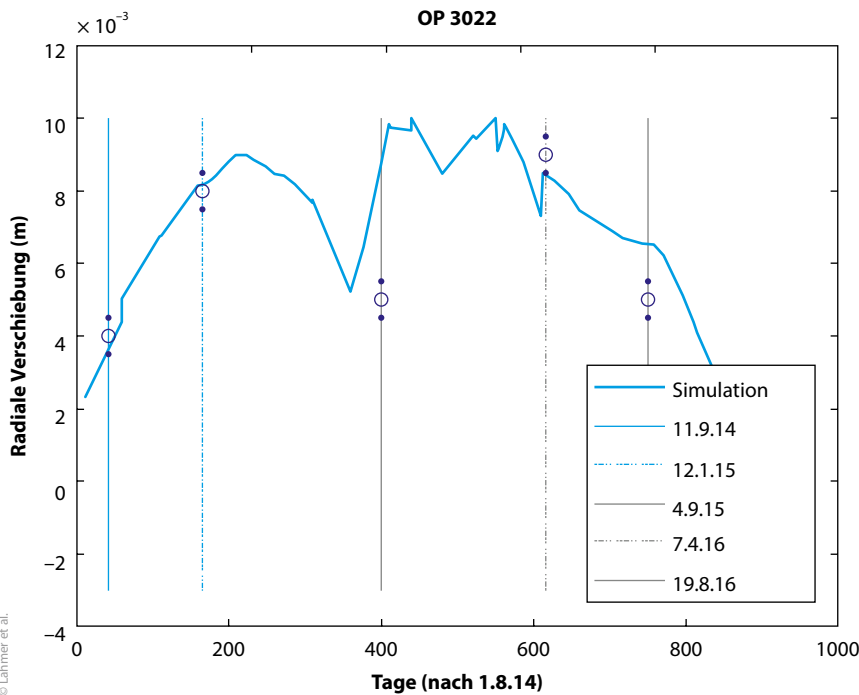


Bild 3: Radiale Verschiebung am Messpunkt OP 3022, Mitte der Staumauer, Krone

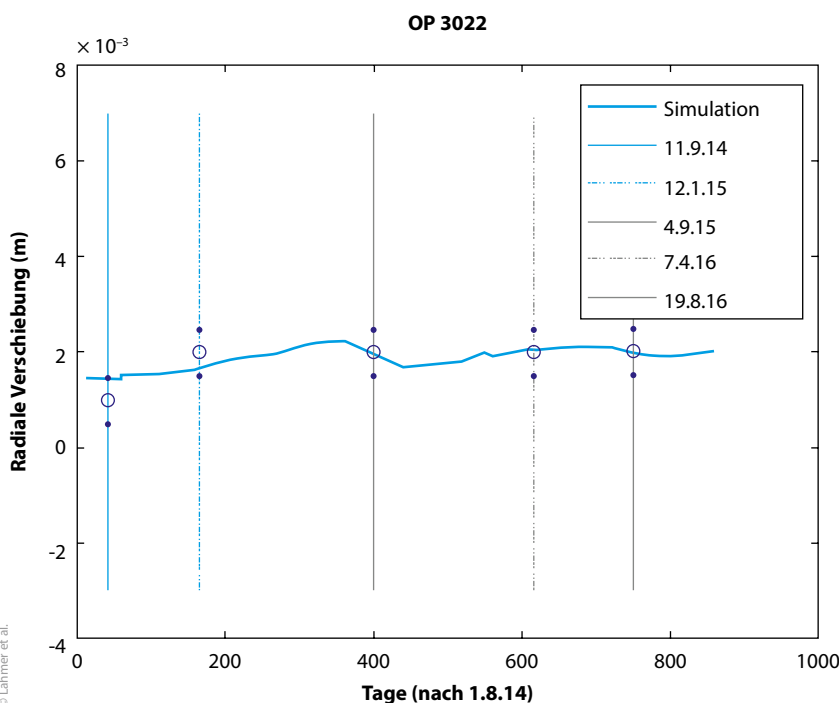


Bild 4: Radiale Verschiebung am Messpunkt OP 3022, Höhe westlicher Schieberturm, oberhalb vom Schieberhaus

Dehnung sowie Dehnung aufgrund von Quell- und Schrumpfungseffekten in Abhängigkeit der hydraulischen Sättigung.

2.2 Materialkennwerte

Materialkennwerte wurden zunächst aus verschiedenen Quellen zusammengetragen. Mit diesen Werten ließen sich bereits Messungen, wie die Kopfpunktverschiebung der Mauerkrone, sehr gut wiedergeben. Da jedoch nicht vollständig Messwerte und simuliertes Antwortverhalten in Über-

einstimmung gebracht werden konnte, wurde mittels Methoden der nicht-linearen Optimierung das Modell an die Daten kalibriert, wobei sensitive Parameter sowohl der Struktur als auch des Untergrunds berücksichtigt wurden. Da eine Modellkalibrierung mit einer höheren Anzahl von unbekanntem Parametern nur unter sehr hohem Rechenaufwand durchführbar ist, werden zunächst Antwortflächen in Form von multivariater Regression generiert und auf diesen die Kalibrierung durchgeführt.

2.3 Simulation

Basierend auf dem gekoppelten THM-Modell wurden in früheren Studien numerische Simulationen des Verhaltens der Fürwiggeltalsperre während eines Probetaus von Oktober 2007 bis April 2008 durchgeführt [3], [4]. Die zeitlich sich verändernde mechanische Verschiebung, die Temperatur und Porenwasserdrücke werden anhand der Messdaten aus [6] validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die numerischen Simulationen das beobachtete Verhalten größtenteils gut wiedergeben können.

Das vorliegende Modell wird nun erneut herangezogen und mit den Randbedingungen des Zeitraums August 2014 bis August 2016 versehen. Zu diesen gehören maßgeblich der Füllstand, die Wasser- und Lufttemperatur.

Die Einheit der Zeitachse in **Bildern 2, 3 und 4** sind Tage gemessen ab dem ersten Tag der übermittelten Daten, d. h. ab dem 1. August 2014.

Entsprechend der eingezeichneten Glättungen werden die Daten in das Modell über Randbedingungen eingepflegt.

3 Abgleich mit Messungen

Im Wesentlichen werden die jahreszeitlich bedingten Veränderungen des strukturellen Verhaltens der Fürwiggeltaumauer gut wiedergegeben. Insbesondere sind die Werte für die mittige radiale Auslenkung der Mauer äußerst gut im Einklang (Bilder 3 und 4).

Es ist jedoch auch zu beobachten, dass einige Größen an den Flanken sowie in unteren Bereichen der Mauer weniger gut im Einklang mit den Messungen standen (geringe Abweichungen). Ein Grund mag dafür sein, dass diese Werte weniger durch thermische Ausdehnungseffekte geprägt sind und allgemein das jahreszeitlich bedingte Verhalten weniger deutlich wird. Da sowohl im Modell als auch in den realen Messungen weitere Quellen von Unschärfe vorliegen (Messfehler, Modellabstraktion, Parameter, Erfassung von geometrischen Details etc.), mag die Diskrepanz im Bereich dieser Unschärfe liegen. Eine genauere Betrachtung für die folgenden Messungen ist jedoch angeraten.

4 Schlussfolgerung

Mit dem vorliegenden Modell, welches die Geometrie, die Kennwerte und Randbedingungen der Staumauer beinhaltet, ist es möglich, das physikalische Verhalten für beliebige Zeiträume zu

berechnen und neu aufgenommene Messwerte vor allem auf Plausibilität zu prüfen. Dies generiert dem Betreiber eine zusätzliche Informationsquelle bei der Einschätzung der Standsicherheit seiner Strukturen.

Autoren

Prof. Dr. rer. nat. Tom Lahmer
Institut für Strukturmechanik
Bauhaus Universität Weimar
Marienstr. 15
99423 Weimar
tom.lahmer@uni-weimar.de

Dr. Long Nguyen-Tuan
Finger-Institut für Baustoffkunde
Bauhaus Universität Weimar
Coudraystr. 11A
99423 Weimar
long.nguyen.tuan@uni-weimar.de

Prof. Dr.-Ing. Volker Bettzieche
Ruhrverband
Kronprinzenstraße 37
45128 Essen
vbe@ruhrverband.de

Literatur

- [1] Pinyol, N. M. A.; Alonso, E. E.; Olivella, S.: Review of beliche dam. In: *Geotechnique* 55 (2005), Nr. 4, S. 267 – 285.
- [2] Lewis, R. W.; Schrefler, B. A.: *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*. Chichester: John Wiley and Sons, 1998.
- [3] Nguyen-Tuan, L.; Könke, C.; Bettzieche, V.; Lahmer, T.: Numerical modeling and validation for 3D coupled-nonlinear thermo-hydro-mechanical problems in masonry dams. In: *Computers and Structures* 178 (2017), Nr. 1, S. 143 – 154.
- [4] Lahmer, T.; Nguyen Tuan, L.; Könke, C.; Bettzieche, V.: Thermo-hydro-mechanische 3-D-Simulation von Staumauern – Modellierung und Validierung. In: *WasserWirtschaft* 106 (2016), Heft 9, S. 27.
- [5] Wang, M.; Chen, Y.-F.; Hu, R.; Liu, W.; Zhou, C.-B.: Coupled hydro-mechanical analysis of a dam foundation with thick fluvial deposits: A case study of the Danba Hydropower Project. In: *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 20 (2016), S. 19 – 44.
- [6] Lahmer, T.: Crack identification in hydro-mechanical systems with applications to gravity dams. In: *Inverse Problems in Science and Engineering* 18 (2010), S. 1 083 – 1 101.
- [7] Demisch, G.; Bettzieche, V.: Sanierung der Fürwiggeltalsperre. Abschlussbericht zum Probetau, Ruhrverband, 2008.
- [8] Carrera, J.; Gens, A.; Alonso, E. E.; Olivella, S.: Numerical formulation for a simulator (CodeBright) for the coupled analysis of saline media. In: *Engineering Computations* 13 (1996), S. 87 – 112.

Tom Lahmer, Long Nguyen-Tuan and Volker Bettzieche
Coupled experimental and numerical analysis of dams based on 3-dimensional multiphase and multifield models
The article discusses possibilities via coupled modelling and monitoring to analyse the physical behaviour of dams more rigorously. A previously developed and calibrated model is considered using as input (boundary values) the data from the real structure at a later time. By this, it might be referred to as a digital twin. In case of high discrepancies with newly measured quantities this may be taken to indicate possible structural chances.

 Springer Professional.de

physikalisches Verhalten Staumauer 

Eichhorn, A.; et al.: Methoden und Modelle bei ingenieurgeodätischen Überwachungsmessungen. In: *Ingenieurgeodäsie*. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2017.
www.springerprofessional.de/link/16141236
Hahn, M.; Reck, M.: Isoparametrisches Konzept. In: *Kompaktkurs Finite Elemente für Einsteiger*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
www.springerprofessional.de/link/16131012