

Thermo-hydro-mechanische 3-D-Simulation von Staumauern – Modellierung und Validierung

In dem vorliegenden Beitrag werden die numerischen Ergebnisse von dreidimensionalen, nichtlinearen, transienten thermo-hydro-mechanischen (THM) Mehrfeldsimulationen am Beispiel der Fürwiggestaumauer gezeigt. Zwei 3-D-Simulationen wurden entsprechend den Randbedingungen eines Probestaus durchgeführt. Die Ergebnisse der gekoppelten THM-Rechnungen wurden mittels vorhandenen Messdaten des Ruhrverbandes in den Größen Verformung, hydraulische Sättigung und Temperatur validiert. Die gute Übereinstimmung mit den Messdaten erlaubt eine Validierung der Modelle und damit deren Nutzung für Prognosen zukünftigen Verhaltens der Bauwerke.

Tom Lahmer, Long Nguyen Tuan, Carsten Könke und Volker Bettzieche

1 Einführung

Viele Staumauern wurden am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts gebaut, z. B. die Fürwiggetalsperre in Deutschland oder die Theodore-Roosevelt-Talsperre in Arizona, USA. Nach mehr als hundert Jahren haben sich die strukturellen Eigenschaften der Bauwerke sichtlich verändert, z. B. können Abdichtungsmaßnahmen, wie wasserseitige Bitumschichten der Staumauern, oder vertikale Drainagesysteme funktionell beeinträchtigt sein. Generell ist davon auszugehen, dass sich die Materialeigenschaften der Staumauern durch Alterung, Verwitterung und chemischer Reaktionen zumindest lokal verändert haben, was zu einer erhöhten Durchsickerung von der Wasser- zur Luftseite führen kann.

Grundsätzlich sind Rehabilitationsmaßnahmen im Laufe der Lebenszeiten von Staumauern üblich, um deren Betriebszeit zu verlängern. Die Erneuerung von Drainagesystemen oder die Erneuerung von Dichtungen sind übliche Ansätze. Zusätzlich werden Messgeräte und Sensoren installiert, um das physikalische Verhalten der Staumauern (z. B. Verformung, Porenwasserdruck, effektive Spannung, Temperatur...) zu überwachen [2], [3].

Im Allgemeinen haben Staumauern drei Hauptbeanspruchungen zu tragen. Die erste ist das Eigengewicht und die zweite Last sowie offensichtlichste Art der Belastung ist der Wasserdruck. Als dritte Last müssen Temperaturveränderungen

berücksichtigt werden, die durch den Effekt der thermischen Ausdehnung und Temperaturdifferenzen zwischen Wasser- und Luftseite zusätzliche mechanische Spannungen induzieren. Die Effekte der Temperatur auf die Verformung der Staumauern und der Wasserinfiltration sind nach den vorliegenden Untersuchungen [2] bedeutend.

Deshalb müssen die Beziehungen zwischen der Wärmeleitung, dem Wassertransport in teilgesättigten Materialien und der Kraft-Verformungs-Relation in numerischen Simulationen der Staumauern gleichzeitig berücksichtigt werden. Darüber hinaus hat die Geometrie der Staumauer häufig eine Bogenform mit komplexen geometrischen Grenzen, um zum Beispiel die Biegemomente im Mauerkörper zu minimieren. Die numerische Simulation als vollständige, gekoppelte 3-D-thermo-hydro-mechanische (THM) Analyse ist daher in Modellen notwendig, um die physikalischen Verhaltensweisen und Prozesse genau zu analysieren.

Gekoppelte numerische Simulationen der Durchströmung mit Hilfe der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in gesättigten porösen Materialien, die an den Staumauern angewandt werden, wurden in Wang et. al. [9] eingeführt. Die numerische Simulationen unter Berücksichtigung von Rissen oder Schäden wird z. B. in [1], [5] diskutiert. Die vollständige Modellierung der Wasserinfiltration und Verformung einer Staumauer unter Temperatureinwirkungen werden allerdings in der Literatur noch nicht berücksichtigt. Die Anwendung solcher gekoppelten Modelle ist bislang nur aus dem Bereich der Bodenmechanik bekannt [4].

Basierend auf dem gekoppelten THM-Modell werden numerische Simulationen des Verhaltens der Fürwiggetalsperre während eines Probestaus durchgeführt. Die zeitliche Verschiebung, die Temperatur und der Wassertransport werden anhand der Messdaten aus [3], [6] validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die numerischen Simulationen das beobachtete Verhalten sehr gut wiedergeben können.

Kompakt

- Eine präzise Modellierung des physikalischen Verhaltens von Gewichtsstaumauern bedarf einer gekoppelten thermo-hydro-mechanischen Analyse.
- Diese ermöglicht effektive Planungen von Rehabilitierungsmaßnahmen und die Identifikation des aktuellen Bauwerkszustands.

2 Numerische Simulation und Ergebnisse

2.1 Grundlagen der Thermo-Hydro-Mechanischen Modellierung

Die THM-Probleme werden durch ein System gekoppelter Bilanz- und Masseerhaltungsgleichungen formuliert (für Details siehe [7] oder [8]). Eine Reihe von Konstitutivgesetze muss formuliert werden, um die primären unbekannt GröÙen der Systeme (d. h. mechanische Verschiebungen, Porenwasserdruck sowie die Temperatur) mit den abhängigen Variablen, wie Wassersättigung, Energiefluss, mechanische Spannung usw., zu verknüpfen. Generell wird in der Theorie der porösen Materialien zwischen verschiedenen Phasen unterschieden, darunter die feste Phase für das Gesteinsmaterial sowie eine flüssige (liquide) Phase für das Wasser und einer gasförmigen Phase zur Abbildung der Luftfeuchte.

2.2 Bilanzgleichungen

Massenerhalt des Fluids

Das Wasser ist sowohl in der flüssigen als auch gasförmigen Form vorhanden. Hier wird jedoch auf Grund von langsamen Stoffströmen durch geringe Permeabilitäten davon ausgegangen, dass der Gasdruck konstant ist und als Null gesetzt werden kann. Es ergibt sich somit die totale Massenerhaltungsgleichung für das Wasser wie folgt:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^w S_l \phi + \theta_g^w S_g \phi) + \nabla \cdot (j_l^w + j_g^w) = f^w \quad (1)$$

Dabei stellt der erste Term eine partielle Ableitung nach der Zeit t dar. θ_l^w und θ_g^w sind die volumetrische Masse des Wassers in der liquiden und gasförmigen Phase. S_l und S_g bezeichnen den Grad der Sättigung des Gases bzw. des Fluids und j_l^w die Porosität des Materials. Ferner sind j_l^w die totale Massenbewegung des Wassers in der flüssigen Phase und j_g^w in der gasförmigen Phase. Unter der Annahme, dass Zwischenräume lediglich Wasser in der gasförmigen und flüssigen Phase enthalten, ergibt sich in Summe:

$$S_g + S_l = 1 \quad (2)$$

Momentengleichgewicht

Die Momentengleichgewichtsbedingung reduziert sich unter Vernachlässigung von Massenträgheitseffekten wie folgt:

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \quad (3)$$

Wobei σ der Spannungstensor ist und b der Vektor der Körperkräfte.

Energiebilanz

Die Gleichung der inneren Energiebilanz in einem porösen Material nimmt die Energie für jede Phase (E_s, E_l, E_g) separat an, wobei E_s die Energie des Feststoffs ist (Solid) und die anderen beiden für die des Fluids und Gases stehen:

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_s \rho_s (1 - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla \cdot (i_c + j_{Es} + j_{El} + j_{Eg}) = f^Q \quad (4)$$

In Gl. (4) bezeichnet i_c den Energiefluss aufgrund von Konduktion durch das poröse Material, die Flüsse j_{Es}, j_{El} und j_{Eg} sind entsprechend der advective Fluss der Energie durch Massenbewegung und f^Q ist eine interne/externe Energiequelle. Mit ρ_s, ρ_l, ρ_g und werden die Dichten der drei Phasen bezeichnet.

2.3 Konstitutivgesetze

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 advectiven Flusses,
- Gesetz nach Fick zur Beschreibung des nicht-advectiven Flusses,
- Gesetz nach Fourier zur Abbildung der konduktiven Wärmeleitung

sowie Modelle zur Berechnung der Wassersättigung aus den Porenwasserdrücken. Mechanisch wird linear-elastisches Verhalten angenommen unter den Effekten der thermischen Dehnung sowie Dehnung aufgrund von Quell- und Schrumpfungseffekten in Abhängigkeit der hydraulischen Sättigung.

3 Ergebnisse und Diskussion

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Szenarien untersucht:

- Das erste Szenario entspricht dem aktuellen Stand der Talsperre. Es wurde eine gekoppelte, transiente THM-Simulation durchgeführt unter Berücksichtigung der nicht-linearen Abhängigkeiten zwischen den ErgebnisgröÙen der verschiedenen drei physikalischen GröÙen. Das Drainagesystem wird in das Modell aufgenommen, die Asphaltsperrschicht

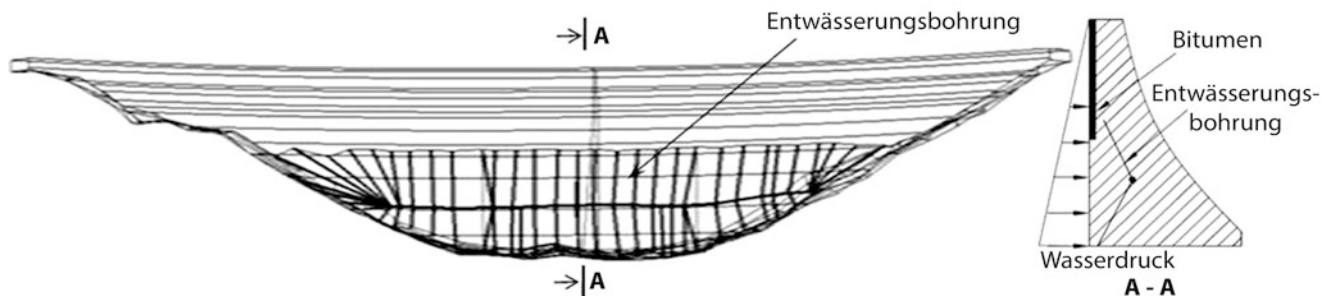


Bild 1: Geometrie-Modellierung mit Drainagesystem (Quelle: Ruhrverband)

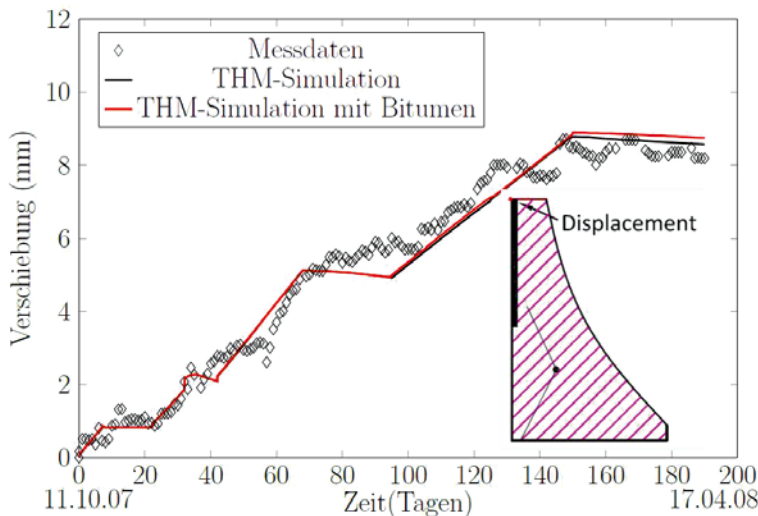


Bild 2: Verschiebung der Dammkrone in Y-Richtung (Tage nach Beginn des Probetaus) (Quelle: Lahmer et. al.)

an der Wasserseite als nicht abdichtend angenommen (**Bild 1**, THM-Simulation).

- Das zweite Szenario ist entsprechend dem ersten, wobei jedoch die Funktionstüchtigkeit der Asphaltsperrschicht als gegeben erachtet wird (bspw. als zukünftige Situation nach einer Sanierungsmaßnahme), d. h. es wird wasserseitig mit einer deutlich zurückgesetzten Permeabilität gerechnet (**Bild 1**, THM-Simulation mit Bitumen).

Als Ergebnisgrößen werden die mechanischen Verschiebungen der Dammkrone über die Zeit des Probetaus dargestellt (**Bild 2**). Es kann eine gute Übereinstimmung des modellierten und des tatsächlich beobachteten Verhaltens des Bauwerks erkannt werden. Die Modellierung der zuvor vorgestellten Szenarien bringt auf mechanischer Seite nur kleine Abweichungen in den Verformungen. So führt die Berücksichtigung der Asphaltsperrschicht zu einer Zunahme der Verschiebung von weniger als 0,1 mm und kann, zumindest für das mechanische Verhalten, ignoriert werden.

Anders sieht dies bei der Berechnung der Temperatur innerhalb des Bauwerks über die Zeit aus (**Bild 3**). Hier wurden zwei Punkte T1.1 und T1.2 ausgewählt für die auf Temperaturmessungen zurückgegriffen werden kann. Generell nimmt die Temperatur über die Zeit ab, wobei dies an T1.1 ausgeprägter ist, da der Punkt näher zur Luftseite liegt und daher von der abnehmenden Lufttemperatur sichtbarer geprägt wird.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Szenarien, so liefert jeweils die Simulation mit der Asphaltsperrschicht die höheren Werte. Dieser Effekt basiert auf der zunehmenden thermalen Leitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes, der bei dem ersten Szenario aufgrund der fehlenden Abdichtung höher ausfällt.

Betrachtet man die Ergebnisse in **Bild 4**, werden die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien am deutlichsten. Hier ist der Grad der hydraulischen Sättigung im Querschnitt und entlang des Bauwerks zu erkennen, wobei rote Werte eine Sättigung von 100 % bedeuten, was einer nassen Region entspricht. Bild 4b zeigt die Ergebnisse zum Szenario 1 (aktueller Stand ohne funktionierende Asphaltsperrschicht). Die roten Bereiche an der Wasserseite korrespondieren mit den sichtbaren nassen Bereichen der Talsperre (Bild 4a). In Bild 4c ist das Ergebnis der

Simulation mit einer Asphaltsperrschicht dargestellt. Die deutlich reduzierte hydraulische Sättigung ist sichtbar, was in einer geringer durchsickerten Staumauer resultieren würde.

Die Verteilung des Grades der hydraulischen Sättigung zeigt jedoch auch die Effektivität des Drainagesystems (enthalten in beiden Szenarien). Der Porenwasserdruck ist im unteren Bereich der Staumauer sichtbar reduziert, was zur Folge hat, dass dieser Teil der Talsperre trocken ist. In diesem Zusammenhang sollte erwähnt werden, dass die mit einer Durchströmung verbundene Auslösung des Mörtels die Alterung und Verwitterung des Bauwerks beschleunigt.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Eine numerische 3-D-Simulation des Einstauprozesses der Fürwiggetalsperre wurde abgebildet. Die Ergebnisse stehen in sehr guter Übereinstimmung mit dem tatsächlich beobachteten physikalischen Verhalten. Die Modelle können daher als validiert erachtet werden und dienen als Basis für weitere Aktivitäten.

Darunter sind zu zählen: Zuverlässigkeitsanalyse, virtuelle Erprobung der Effektivität von Sanierungsmaßnahmen sowie

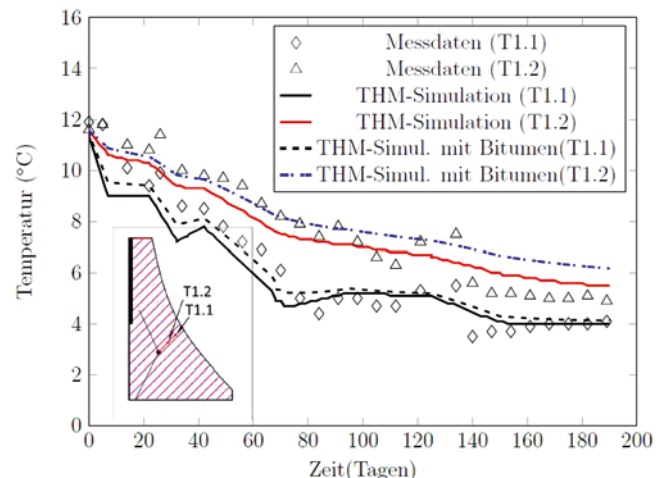


Bild 3: Temperaturentwicklung innerhalb der Staumauer über die Zeit (Tage nach Beginn des Probetaus) (Quelle: Lahmer et. al.)

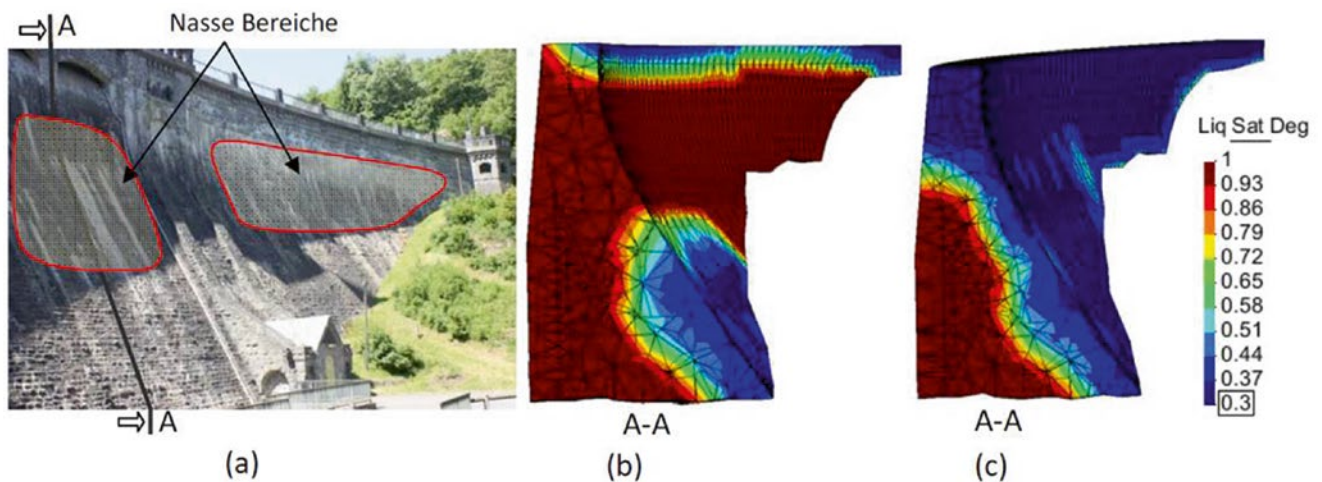


Bild 4: Feuchtigkeit nach dem Einstauprozess: a) Beobachtung an der Luftseite, b) Simulation ohne Asphaltsperrschicht (entsprechend aktuellem Zustand), c) Simulation mit Asphaltsperrschicht (Quelle: Lahmer et. al.)

die Identifikation von örtlich veränderten Materialkennwerten, die Hinweise auf lokale Schädigungen liefern können [6].

Ferner dient das jetzige Modell als Referenz für den derzeitigen Zustand des Bauwerks. Der Vergleich an Messungen kann in Zukunft turnusmäßig wiederholt werden. Sich möglicherweise ergebende Diskrepanzen zwischen Messung und Simulation können genutzt werden, um Deteriorationsraten der Bauwerke zu ermitteln und diese erneut in Zuverlässigkeitsbetrachtungen einfließen zu lassen.

Autoren

Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Tom Lahmer
Dr.-Ing. Long Nguyen-Tuan
Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke
 Institut für Strukturmechanik
 Bauhaus-Universität Weimar
 Marienstraße 15
 99423 Weimar
 tom.lahmer@uni-weimar.de
 long.nguyen.tuan@uni-weimar.de
 carsten.koenke@uni-weimar.de

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

Literatur

- [1] Alonso, E. E.; Olivella, S.; Pinyol, N. M. A: Review of Beliche dam. In: Géotechnique 55 (2005), Nr. 4, S. 267-285.
- [2] Bettzieche, V.; Demisch, G.: Sanierung der Fürwiggetalsperre: Abschlussbericht zum Probestau. Technischer Bericht, Ruhrverband, 2008.
- [3] Bettzieche, V.: Mathematisch-statistische Analyse von Messwerten der Talsperren-überwachung. In: WasserWirtschaft 94 (2004), Nr. 1/2, S. 1-5.
- [4] Gens, A.; Garcia-Molina, A. J.; Olivella, S.; Alonso, E. E.; Huertas, F.: Analysis of a full scale in-situ test simulating repository conditions. In: Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 22 (1998), S. 515-548.
- [5] Lahmer, T.: Crack identification in hydro-mechanical systems with applications to gravity dams. In: Inverse Problems in Science and Engineering 18 (2010), Nr. 8, S. 1 083-1 101.
- [6] Lahmer, T.; Könke, C.; Bettzieche, V.: Optimale Positionierung von Mess-einrichtungen an Staumauern zur Bauwerksüberwachung. In: Wasser-Wirtschaft 100 (2010), Nr. 10, S. 16-19.
- [7] Lewis, R. W.; Schrefler, B. A.: The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media. Wiley Series in Numerical Methods in Engineering, 1998.
- [8] Olivella, S.; Carrera, J.; Gens, A.; Alonso, E. E.: Numerical formulation for a simulator (CODEBRIGHT) for the coupled analysis of saline media. In: Engineering Computations 13 (1996), S. 87-112.
- [9] 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, Southwestern China. In: European Journal of Environmental and Civil Engineering (2015), S. 1-26 (Online-Veröffentlichung).

Tom Lahmer, Long Nguyen Tuan, Carsten Könke and Volker Bettzieche

Thermo-Hydro-Mechanical 3D-Simulation of a Dam: Modelling and Validation

We introduce in this paper a fully coupled thermo-hydro-mechanical (THM) model to describe the physical phenomenon present in masonry materials. Two 3D numerical simulations are carried out for the THM analysis of a dam during its impounding process. The results of the coupled THM analyses are validated with measurements recorded during that process in terms of transient displacement, water saturation and temperature values. An agreement between numerical simulations and measured data proves that the coupled THM model can well reproduce the multi-physical behaviour of masonry dams.



Weitere Empfehlungen aus www.springerprofessional.de:

Probestau

Cherubim, C.: Analyse des Verhaltens einer 100-jährigen Talsperre vor und bei Entleerung, Sanierung und Probestau. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 01-02/2014. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. www.springerprofessional.de/link/3418104

Roesler, F.: Vertiefte Analyse der Messdaten an der Ennepestaumauer – 10 Jahre nach ihrer Sanierung. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 09/2014. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. www.springerprofessional.de/link/3418624