

Ein Rissmodell mit gekoppelter Strömungsdruckberechnung für den Standsicherheitsnachweis von Staumauern

EUROROCK 2000, Aachen, März 2000

Dr.-Ing. C. König, Dr.-Ing. C. Blömer

GKW Ingenieurgesellschaft mbH, Bochum, Markstr. 77, 44801 Bochum

Dr.-Ing. V. Bettzieche

Ruhrverband Essen, Kronprinzenstr. 37, 45128 Essen

Dr.-Ing. C. Könke

RWTH, Aachen University of Technology, Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52056 Aachen

ZUSAMMENFASSUNG: Die numerische Simulation von Spannungsfeldern und Strömungsdrücken stellt ein gekoppeltes Problem zwischen der mechanischen Aufgabenstellung und der Strömungsrechnung dar. Die Druckhöhe des Strömungsfeldes beeinflusst das Spannungsfeld, während umgekehrt das mechanische Problem die Druckhöhe beeinflussen kann, wenn Risse entstehen. Dieses Problem des "Hydrofracturing" kann nicht mittels verschmierter Rissmodelle simuliert werden. Die physikalisch exakten Randbedingungen können nur mit Hilfe diskreter Rissmodelle abgebildet werden.

Für diese Problemstellung wurde ein Zweischrittverfahren entwickelt, mit dem eine gekoppelten Strömungs- und Rissfortschrittsberechnung durchgeführt werden kann. Dieses Verfahren wird anhand einer Berechnung aus dem Talsperrenbereich vorgestellt.

ABSTRACT: The numerical simulation of stress and pressure fields in fractured porous media presents a highly nonlinear coupled problem of structural and fluid mechanics. The stress field is depending on the fluid pressure field and the fluid pressure field is influenced by the changing boundary conditions along the propagating crack. This "hydrofracturing" problem, which has been already intensively studied in the area of oil exploitation simulations, can not be appropriately represented by a smeared crack model. The physical boundary condition along the free crack surfaces can only be approximated with a discrete crack model.

An incremental two-step method has been developed to realise a coupled calculation of pressure and crack propagation. The method will be demonstrated by a hydrofracture-simulation of a masonry dam.

1. Einleitung

Viele Talsperren in Deutschland werden durch Bruchsteinmauern eingestaut, die vor nahezu 100 Jahren errichtet wurden. Die Staumauern besitzen einen etwa dreiecksförmigen Querschnitt, der unter Verwendung von großen Bruchsteinen mit Kantenlängen von 0,50 m und größer von Hand aufgemauert wurde. An den Außenflächen der Staumauern wurden die Steine besonders sorgfältig gesetzt und möglichst wasserdicht vermörtelt. Im Mauerinneren wurden die Steine zum Teil gekippt, aber auch hier wurden etwaige Hohlräume sorgfältig mit Steinbrocken aufgefüllt und vermörtelt. Die

Gründung der Staumauern erfolgte auf dem anstehenden Fels, der vom darüberliegenden Talschotter befreit und bis auf den gesunden Fels ausgehoben wurde. Der Standsicherheitsnachweis dieser Staumauern kann mit numerischen Methoden durchgeführt werden. Zu einer realitätsnahen Abbildung der gekoppelten mechanischen und hydromechanischen Einzelprozesse müssen die hierfür verwendeten Methoden die Belastungen aus Temperatur und Strömungsdruck sowie die Rissausbreitung abbilden können.

Bei den für die Berechnung des Rissfortschritts verwendeten Methoden ist grundsätzlich zwischen verschmierten und diskreten Riss-

modellen zu unterscheiden. Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf einem diskreten Rissfortschrittsmodell. Dies hat den Vorteil, dass die physikalischen Effekte wesentlich besser abgebildet werden. Das Modell liefert eine Abbildung der makroskopisch großen Defekte mit einem numerisch stabilen Verfahren ohne 'stresslocking Effekte' wie sie bei verschmierten Rissmodellen auftreten können.

Die Leistungsfähigkeit der Modelle soll anhand der diskreten Rissimulation, gekoppelt mit einer Strömungsdruckberechnung für eine Staumauer gezeigt werden.

2. Prozessbeschreibung der Rissfortschritts-Berechnung

Aufgrund von Klüftung und Schichtung des Untergrundes einer Talsperre infolge Sedimentation und Belastungsgeschichte weist der Fels ein anisotropes Materialverhalten auf. Diese Klüfte haben jedoch nur eine kleine Zugfestigkeit, die durch Mineralisierung innerhalb der

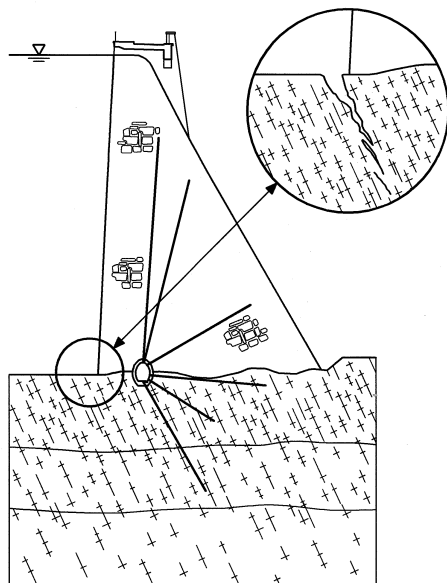


Bild 1: Riss am Fuß einer Staumauer

Klüftflächen und auf Kohäsion zurückzuführen ist. Wird diese Zugfestigkeit überschritten, so kommt es zu einem Auseinanderreißen der Kluft und es entsteht ein Riss.

Der Bereich einer Talsperre, in dem die Wahrscheinlichkeit eines strukturellen Versagens am größten ist, liegt in der Regel am Staumauerfuß, der weit unterhalb des angestauten Wasserspiegels liegt (siehe Bild 1). Bei der Berechnung eines Rissfortschritts dürfen daher die inneren Kräfte, die durch in den Riss eindringendes Wasser entstehen, nicht vernachlässigt werden. Diese Kräfte sind von der

Rissöffnungsweite abhängig. Im geöffneten Riss bewirkt der hydrostatische Wasserdruck direkte Druckkräfte. In der Rissfortschrittszone verursacht der abnehmende hydrostatische Druck eine Abnahme der äußeren Lasten auf

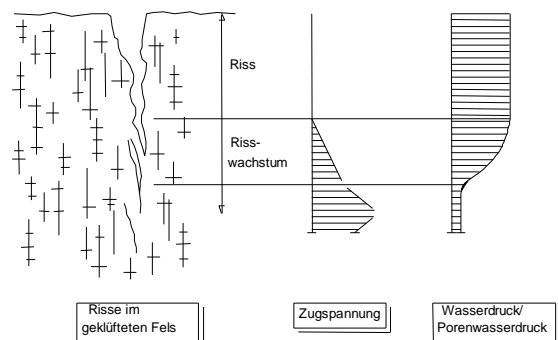


Bild 2: Prozess des Risswachstums

die Risspitze und somit eine Zunahme der Spannungen im Material (siehe Bild 2). Ein Materialversagen tritt nur dann auf, wenn eine kritische Bruchenergie überschritten wird.

Soll der Rissfortschritt in einem geklüfteten Fels berechnet werden, so muss ein anisotropes Materialgesetz (Mohr-Colomb) zugrunde gelegt werden, das die Bruch- und Restfestigkeit in Abhängigkeit der Hauptklüftrichtungen beschreibt.

3. Makrorissfortschrittberechnung

Die Modellierung diskreter Rissfortschrittsprobleme mit Hilfe der Finiten-Element-Methode (FEM) wurde zu Beginn der 80er Jahre erstmals von Saouma und Ingraffea unabhängig von der gewählten Vernetzung vorgestellt und von Swenson 1985/87 weiterentwickelt [3]. Diese Verfahren wurden inzwischen auch bei der Betrachtung von dreidimensionalen Problemen der linear-elastischen Bruchmechanik angewandt [5]. In dieser Methode wird der Riss mit Hilfe von diskreten Rissinkrementen in der Struktur modelliert. Um dieses Vorgehen für linear-elastische Probleme einsetzen zu können, muss jedoch im Modell ein Anfangsriss - initial crack - vorgegeben sein. Die Lage des Anfangsrisses lässt sich in vielen Fällen aus einer Betrachtung der Spannungsverteilung in der ungeschädigten Struktur vorhersagen.

Der Anfangsriss wird als diskreter Riss in das FE-Modell eingeführt, das heißt die beiden Rissflächen werden als freie Randflächen im Modell berücksichtigt. Die Risspitze beziehungsweise Rissfront kann mit speziellen Risspitzelementen modelliert werden, die bei-

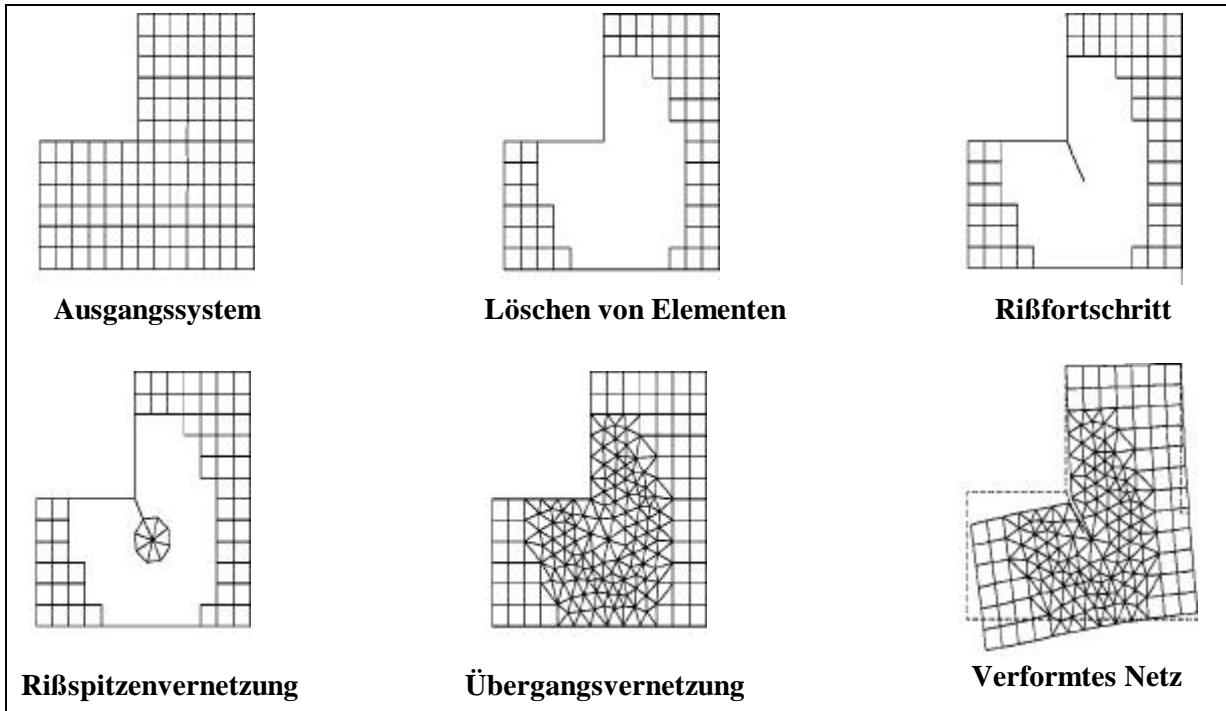


Bild 3: Vorgehen bei der Neuvernetzung des diskreten Risses

spielsweise für den Fall der linear-elastischen Bruchmechanik eine Spannungssingularität an der Rissspitze simulieren. Nachdem die Struktur mit Riss berechnet wurde, lässt sich mit Hilfe bruchmechanischer Kenngrößen wie den Spannungsintensitätsfaktoren oder dem J-Integral eine Aussage über die Richtung und die Größe des nächsten Rissinkrements gewinnen. Für Probleme der Dauerfestigkeit lassen sich die entsprechenden phänomenologischen Wachstumsgesetze - Gleichungen von Paris oder Foreman - auswerten [6].

Das grundsätzliche Vorgehen der diskreten Rissfortschrittssimulation ist in Bild 3 prototypisch dargestellt. Man erkennt, dass sowohl die FE-Vernetzung, als auch das geometrische Modell jeweils an die neue Rissgeometrie angepasst werden müssen. Der Rissfortschritt infolge quasistatischer Belastungen wird inkrementell verfolgt. Die Richtung des Rissfortschritts wird dabei jeweils senkrecht zur Richtung der Hauptzugspannung festgelegt.

4. Kopplung von Riss- und Strömungsberechnung

Bei "Hydrofracturing"-Problemen müssen die für das Risswachstum verantwortlichen Kräfte berücksichtigt werden, die durch das Wasser entstehen, das in den Riss eindringt. Mit

jedem Rissinkrement muss eine neue Strömungsberechnung mit veränderten Randbedingungen durchgeführt werden, die die neuen im Riss wirkenden Drucklasten für die weitere Rissfortschrittsberechnung liefert. Dieses Zweischrittverfahren wurde für die FEM-Berechnung in dem Programmsystem SPRING [8] automatisiert.

Am Anfang des Verfahrens steht eine Strömungsberechnung und eine darauf aufbauende Berechnung des ungeschädigten Spannungszustandes. Basierend auf dieser Berechnung wird ein Anfangsriss festgelegt. Dieser initiale Riss wird an der Stelle der größten Hauptzugspannung, senkrecht zu dieser eingeführt. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird der Bereich des Anfangsrisses neu vernetzt. Anschließend wird eine Strömungsberechnung mit im Riss neu definierten Randbedingungen durchgeführt. Diese liefert die Drucklast für den nachfolgenden Schritt der Spannungsberechnung. Aus dieser Spannungsberechnung folgt als Ergebnis das neue Rissinkrement. Nach der Neuvernetzung im Bereich des Rissinkrements erfolgt wieder eine Strömungsberechnung mit veränderten Randbedingungen. Diese Iteration wird solange fortgesetzt, bis der Riss nicht mehr weiter wächst, d.h. die im Riss anstehenden Kräfte die kritische Bruchenergie nicht mehr überschreiten.

5. Anwendung

In einer beispielhaften Anwendung wird die Leistungsfähigkeit und Stabilität der vorgestellten Algorithmen untersucht. Die in Bild 4 dargestellte Staumauer besitzt einen Drainagestollen und Drainagebohrungen, die die Staumauer entwässern. Das komplexe Strömungsfeld in der Staumauer und die Wirkung von Rissen, die bei extremen Situationen nicht auszuschließen sind, kann nur mit der oben beschriebenen Vorgehensweise einer gekoppelten Strömungs- und Rissberechnung realitätsnah abgebildet werden und somit die Standsicherheit der Staumauer nachgewiesen werden.

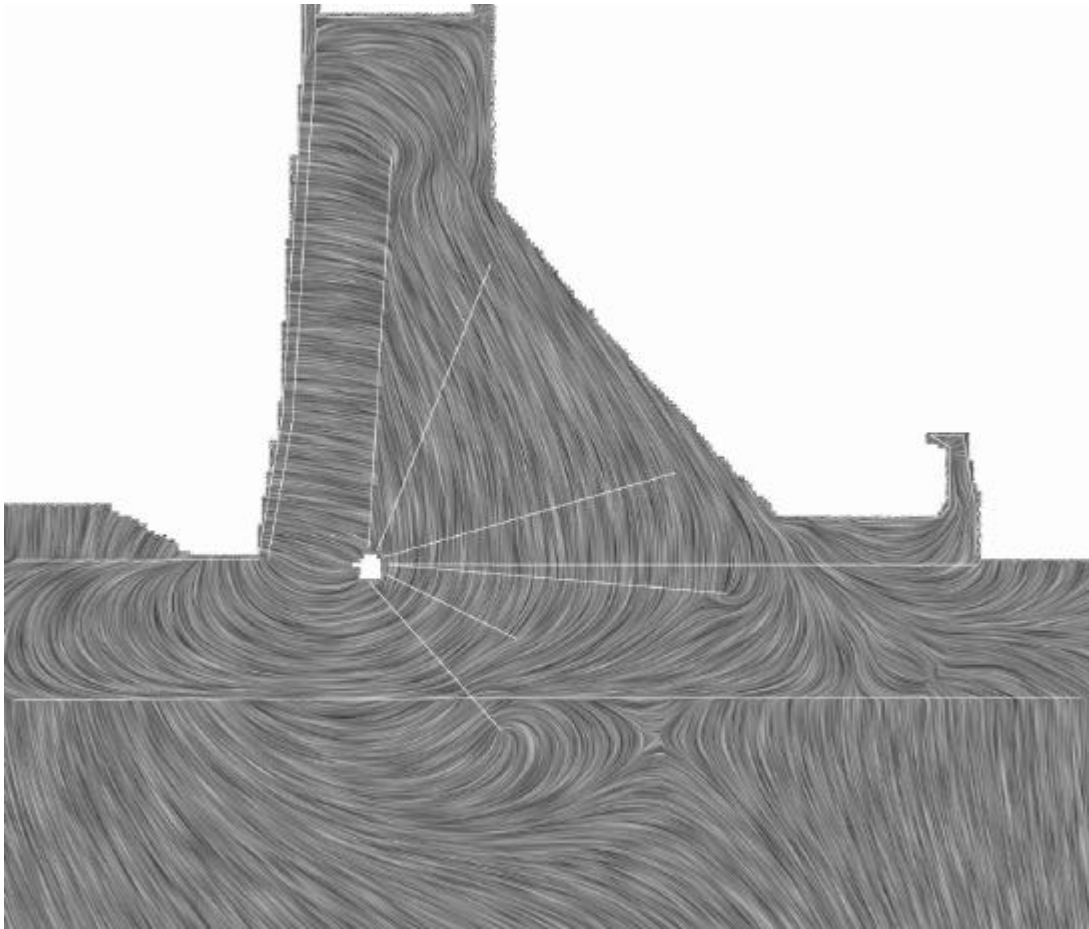


Bild 4: Strömung in der Staumauer

Zu Anfang der Berechnung wurde das Strömungsproblem im ungeschädigten Zustand betrachte. Es wurde eine Sickerrandbedingung für den luftseitigen Rand und die Drainageeinrichtungen im Inneren der Staumauer sowie eine Festpotentialrandbedingung auf der Wasserseite angesetzt. Das aus dem daraus resultierenden freien Randwertproblem berechnete Strömungsfeld ist in Bild 4 dargestellt.

Die Berechnung des mechanischen Problems liefert zunächst die aus der Literatur bekannten großen horizontalen Zugspannungen am wasserseitigen Mauerfuß. Hier wird die Lage des Anfangsrisses am Übergang zwischen Mauerfuß und geklüfteten Untergrund gewählt (Bild 5). Die anschließende Iteration der Strömungs- und Rissfortschrittsberechnung führt zu einem Riss, der schräg unter dem Mauerfuß in den Felsuntergrund verläuft. Bild 6 zeigt die Hauptspannungstrajektorien und die vertikalen Druck- oder Zugspannungen zum Ende der Berechnung.

Der mehrere Meter lange Riss hat zu einer Zugentlastung im Mauerfußbereich geführt. Die

Zugspannungen an der Risspitze haben sich durch Lastumlagerung soweit reduziert, dass das Energiekriterium greift und die Risspitze stehen bleibt. Die Staumauer bleibt auch in dieser Extremsituation standsicher.



Bild 5: Verschiebungszustände während des Risswachstums

6. Zusammenfassung

Es wurde gekoppeltes Strömungs-Rissmodell mit einer diskreten Rissberechnung zum Nachweis der Standsicherheit einer Staumauer vorgestellt. Die Rissfortschrittsberechnung wurde durch die komplexe mitwandernde Wasserlast beeinflusst und veränderte in einem lokalen Bereich die Strömungsdruckverhältnisse.

Wie aus der Literatur bekannt ist, führen horizontalen Zugspannungen zu vertikalen Entlastungsrissen im Fels am wasserseitigen Fuß der Staumauer. Die Richtung und Ausdehnung dieser Risse ist im Wesentlichen durch die Materialeigenschaften des Felses bestimmt. Die Entstehungsgeschichte des Felses sowie die Verwitterung haben im Fels Trennflächen, wie Schichtung und Klüfte entstehen lassen. Diese schwächen das eigentliche Material, da senkrecht zu den

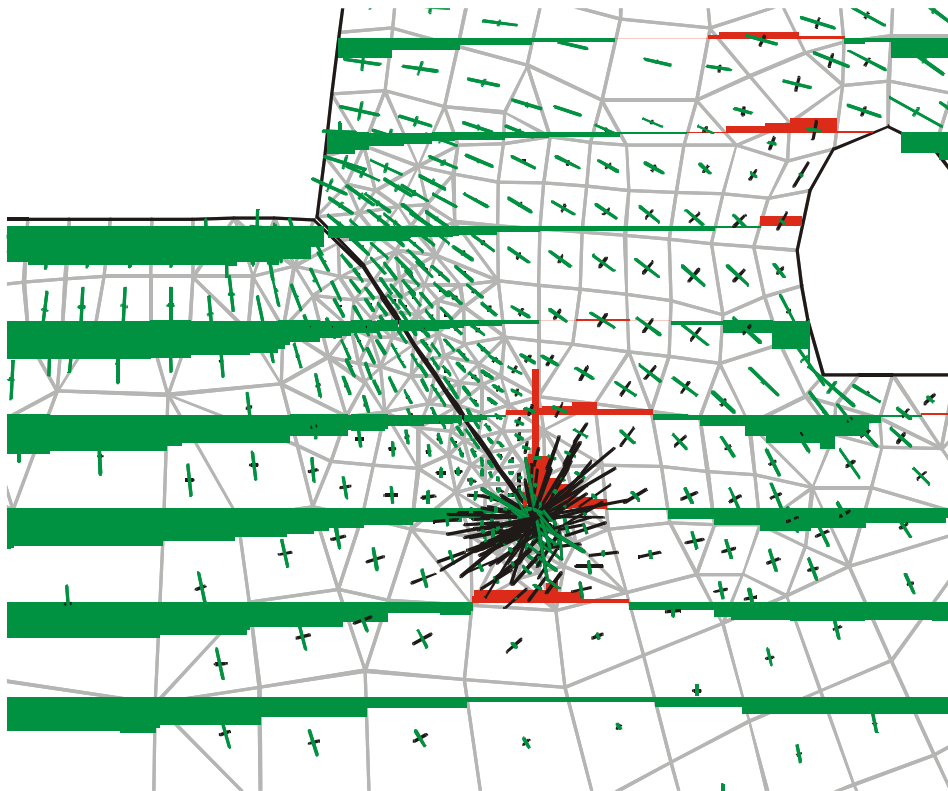


Bild 6: Spannungstrajektorien und Druck- und Zugspannungen nach Abschluß der Rissberechnung

mögliche Schubübertragung verringert wird. Der Riss folgt den Trennflächen vom Staumauerfuß in den Untergrund, bis der Fels soweit gerissen und durch die Rissöffnung entlastet ist, dass der Riss nicht weiter fortschreitet.

7. Literatur

- [1] Rashid, Y.R.: Ultimate Strength Analysis of prestressed concrete pressure vessels, Nuclear Engineering and Design 7 (1968), 334-344.
- [2] Rots, J.G.: Computational Modeling of Concrete Fracture, PH.D. Thesis, University Delft, 1988.
- [3] Wawrzynek, P.A., Ingraffea A. R.: Discrete Modeling of Crack Propagation. Theoretical Aspects and Implementation Issues in Two and Three Dimensions, Department of Structural Engineering,
- [4] Cervenka, J.: Discrete Crack Modeling in Concrete Structures, Ph.D. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, 1994.
- [5] Potyondy, D.O.: A Software Framework for Simulating Curvilinear Crack Growth in Pressurized Thin Shells, School of Civil and Environmental Engineering, Report Number 93-5, Cornell University, Ithaca, New York, 1993
- [6] Broek, D.: Elementary engineering fracture mechanics, Noordhoff International Publishing, 1974.
- [7] Bettzieche, V.: Temperaturmessungen und -berechnungen am Beispiel einer alten Gewichtsstaumauer, Wasserwirtschaft 87 (1997); www.ruhrverband.de.
- [8] SPRING; SPRING User's Manual Version 1.1 (1999) GWK Ingenieurgesellschaft, Bochum.

