ETH zürich

ETH Library

# Talsperren-Stausee-Interaktion im Zeitbereich basierend auf der Methode der Randelemente

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**
Wepf, Dietrich

**Publication date:**
1987

**Permanent link:**
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-000412776

**Rights / license:**
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Dissertation ETH Nr. 8321

# TALSPERREN - STAUSEE - INTERAKTION IM ZEITBEREICH BASIEREND AUF DER METHODE DER RANDELEMENTE

Abhandlung
zur Erlangung des Titels eines
Doktors der technischen Wissenschafzen

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

Vorgelegt von
DIETRICH WEPF
Dipl. Bauing. ETH
geboren am 10. September 1953
von Müllheim, Kanton Thurgau

angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. H. Bachmann, Referent
Dr. J. P. Wolf, Korreferent

Zürich 1987

## ZUSAMMENFASSUNG

Wie Studien aus jüngster Zeit dokumentieren, ist in der Berechnung der Spannungen und Verschiebungen von Schwergewichtsmauern unter Erdbebenbeanspruchungen der Wechselwirkung zwischen dem Schwingungsverhalten der Staumauer und den durch das Reservoir hervorgerufenen hydrodynamischen Kräften besondere Beachtung zu schenken. Die Teilsysteme Staumauer und Reservoir weisen dabei unterschiedliche Eigenschaften und ein unterschiedliches Verhalten auf. Das Teilsystem Reservoir kann beliebig geformt und halbunendlich ausgedehnt sein. Durch die Vernachlässigung der im Falle von Erdbebenbeanspruchungen unbedeutenden konvektiven Terme in der das Reservoir beschreibenden Wellengleichung zeichnet sich dieses Teilsystem in der Folge durch lineares Verhalten aus. Im Gegensatz dazu steht jedoch die endliche geometrische Abmessungen aufweisende Substruktur Staumauer, die einerseits durch Rissebildung und Konstruktionsfugen und andererseits durch die Materialeigenschaften des Massenbetons sehr starke Nichtlinearitäten aufweist. Obwohl die Modellierung der beiden Teilsysteme zur Erfassung der spezifischen Eigenschaften im Prinzip unabhängig erfolgen kann, ist aufgrund der auftretenden Nichtlinearitäten das gesamte dynamische System im Zeitbereich zu untersuchen.

In der vorliegenden Arbeit wird für das Teilsystem Reservoir ein mathematisch-numerisches Modell entwickelt, das sich zur Erfassung der Wasser-Struktur-Interaktionsproblematik von zweidimensional abbildbaren Talsperrensystemen infolge seismischer Einwirkung eignet. Dabei wird insbesondere die Voraussetzung zur Berücksichtigung von nichtlienaren Strukturen geschaffen. Der Lösungsalgorithmus wird verschiebungsabhängig formuliert und erstmals direkt im Zeitbereich aufgestellt. Spezielles Gewicht wird sodann der korrekten Erfassung der Abstrahlungsdämpfung in halbunendlich ausgedehnte Reservoirbecken beigemessen. Die Modellgrösse wird anschliessend durch adäquate Modifizierungen auf ein Minimum reduziert. Die am Staumauer-Reservoir-Interaktionsrand liegenden Unbekannten werden sodann ermittelt. Die Formulierung wird darüberhinaus schliesslich derart aufgebaut, dass einerseits wandernde seismische Wellen korrekt berücksichtigt und andererseits bei einer späteren Fortsetzung der Forschungsarbeit unter Zuhilfenahme der selben Vorgehensweise sowohl Boden-Struktur- als auch Boden-Wasser-Interaktionseffekte behandelt werden können.

Die gewählte Methode zur Entwicklung eines mathematischen Modells zur Abbildung des Teilsystems Reservoir stützt sich auf die Randelementmethode

ab, die lediglich eine Diskretisierung der Ränder des Reservoirs erfordert. Die Erarbeitung der in hydrodynamischen Drücken dargestellten Grundgleichung im Frequenzbereich führt auf die gesuchte verschiebungsabhängige Formulierung. Durch eine entsprechende Wahl der sogenannten fundamentalen Lösung wird die freie Seeoberfläche des Reservoirs und die Energieabstrahlung in die unendlich ausgedehnte Ebene exakt berücksichtigt. Mit der Einführung eines fiktiven, auf analytischen Lösungsansätzen basierenden Abstrahlungsrandes im Uebergang vom beliebig geformten Reservoirteil zum halbunendlich ausgedehnten Reservoirteil konstanter Tiefe wird die Abstrahlungsdämpfung in die halbunendlich ausgedehnte Wasserschicht annähernd exakt berücksichtigt. Mit einem speziellen Reduktionsverfahren werden anschliessend alle Variablen, die nicht an der Oberstromseite der Mauer liegen, sofort wieder eliminiert. Die daraus resultierende, starke Singularitäten aufweisende hydrodynamische Steifigkeitsmatrix ergibt die Verbindung zwischen den vorgegebenen Verschiebungen und den gesuchten, hydrodynamischen Drücken an der Oberstromseite der Mauer. Damit die hydrodynamische Steifigkeitsmatrix anschliessend in den Zeitbereich transformiert werden kann, wird der singuläre Anteil, der als Dämpfer interpretiert werden kann, abgespalten. Der verbleibende reguläre Anteil wird mittels der diskreten, inversen Fouriertransformation in den Zeitbereich übergeführt. Das im Zeitbereich resultierende Faltungsintegral wird schliesslich nur noch über die Terme am Struktur-Reservoir-Interaktionsrand ausgeführt.

Die Beispielrechnungen für eine einfache Stauseegeometrie zeigen eine ausgezeichnete Uebereinstimmung der Randelementlösung mit den Ergebnissen der analytischen Lösung. Für unregelmässige Beckenformen, für die keine analytischen Lösungen sowie andere Vergleichsmöglichkeiten im Zeitbereich existieren, wird, ausgehend von einer seismischen Anregung des Systems, sowohl eine Berechnung direkt im Zeitbereich als auch eine Kontrollrechnung im Frequenzbereich durchgeführt. Die aus diesen Vorgehensarten resultierenden hydrodynamischen Kräfte zeigen wiederum eine sehr gute Uebereinstimmung. Schliesslich wird zur Bekräftigung der vorgeschlagenen Rechenmethode der verschiebungsabhängig formulierte Algorithmus derart umgeformt, dass die Ergebnisse mit denjenigen einer auf einem Zeitschrittverfahren basierenden, beschleunigungsabhängig formulierten, direkten Randelementmethode verglichen werden können.

## SUMMARY

In the analysis of the stresses and displacements of a concrete gravity dam, the effect of the hydrodynamic forces of the reservoir has to be taken into account, as was recently shown in studies.

The substructures dam and reservoir hereby show different properties and different behaviour. The substructure reservoir may be of arbitrary shape and also may be extended to infinity. Through the neglection of the convective terms in the wave equation, which are of no importance in the case of earthquake loading, the reservoir shows linear behaviour. In contrary to that the substructure dam, which has finite geometric dimensions, will exhibit strong nonlinearities arising from the behaviour of cracks and joints, the constitutive law of concrete, partial uplift and cavitation. Although the substructures can be modelled independently, the total dynamic system has thus to be analysed in the time domain.

In the present investigation for the case of twodimensional dam systems a mathematical-numerical model for the substrucutre reservoir is derived which is suited to account for the water-structure-interaction. Thereby the conditions for the recognition of nonlinear structures are set up. The solution is based on displacements and for the first time developed directly in the time domain. Special attention is given to the modelling of the radiation damping into the half-infinite part of the substructure reservoir. The problem size then is reduced through adequate modifications. With that the investigation finally is restricted to the unknowns lying at dam-reservoir-interface only. Moreover the formulation is set up in a way that travelling waves can be recognized in investigations without difficulties and that soil-structure as well as soil-reservoir-dam-interaction can be added later.

The chosen method for the development of the mathematical model for the substructure reservoir is conveniently based on the boundary element method. The discretization of the reservoir then is restricted to the upstream face of the dam and the irregular part of the bottom of the reservoir. The development of the governing equation in the frequency domain which is derived in terms of hydrodynamic pressures leads to a displacement dependent formulation. By selecting an appropriate fundamental solution the free surface of the reservoir and the energy radiation into the infinite plane are satisfied exactly. Through the introduction of a fictitious

radiation boundary based on the analytical solution a more rigorous calculation of the infinite part of the reservoir of constant depth is performed. A sophisticated prodedure is used to eliminate straightforwardly all variables which do not lie on the upstream face of the dam. As many operations as possible are thus performed in the frequency domain. The resulting hydrodynamic stiffness matrix exhibits strong singularities. To be able to transform the dynamic-stiffness matrix, the singular part, consisting of a damper, is split off. The remaining regular part is transformed using an inverse, discrete Fourier transform algorithm. This formulation then leads to convolution integrals in time, which, however, involve only quantities on the upstream face of the dam.

Excellent agreement of the boundary-element solution with the analytical values for a reservoir of constant depth exists. Among others, an example of a reservoir consisting of a finite, irregular part with an arbitrary shape of the bottom and a regular part of constant depth extending to infinity is analysed. The resulting hydrodynamic forces are compared with those determined in the frequency domain. As a further substantiation, the results are then compared with those determined by the direct boundary element method based on a time stepping scheme.