



Doctoral Thesis

Verhalten eines Flussdammes unter wiederholter Hochwasserbelastung

Author(s):

Mayor, Pierre A.

Publication Date:

2013

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010028707> →

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](#).

DISS. ETH Nr. 21367

Verhalten eines Flussdammes unter wiederholter Hochwasserbelastung

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

PIERRE ANDRÉ MAYOR

Dipl. Bauing. ETH

geboren am

28. Juli 1953

Bürger von St. Martin (VS)

Angenommen auf Antrag von

Referentin: Prof. Dr. Sarah M. Springman

Korreferenten: Prof. Dr. Robert M. Boes

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Richard A. Herrmann

2013

Kurzfassung

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahrzehnte haben die Grenzen des Hochwasserschutzes deutlich ans Licht gebracht. Die Analyse der Auswirkungen von Klimaänderungen lässt zudem eine Erhöhung des Hochwasserrisikos befürchten. Viele Flussdämme als wichtiger Bestandteil des Hochwasserschutzes stammen aus dem 19. Jahrhundert und entsprechen nicht mehr dem heutigen Stand der Technik. Der Handlungsbedarf ist gross und es müssen Prioritäten entsprechend dem Gefährdungspotential gesetzt werden. In dieser Hinsicht sind zusätzliche Kenntnisse vom Verhalten der Flussdämme unter wiederholter Hochwasserbelastung und wechselnder Witterung notwendig.

Die Reaktion eines Flussdammes auf Wasserspiegelschwankungen und Witterungseinflüsse ist ein komplexer transienter Prozess an einem nicht gesättigten Bauwerk, der nur mit Hilfe der ungesättigten Bodenmechanik rechnerisch erfasst werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde deshalb ein Feldversuch durchgeführt, einerseits um die Dammreaktion auf die Beanspruchungen durch wiederholte Hochwasserbelastung und wechselnder Witterung zu erfassen und andererseits um die ungesättigten geotechnischen Bodeneigenschaften in situ zu bestimmen.

Für die Felduntersuchungen wurde ein 12.5 m langer Abschnitt des Rhonedamms in der Nähe von Visp (VS) durch eine Spundwandzelle isoliert, in der durch Auffüllen der Wasserseite künstliche Hochwasserzustände erzeugt wurden. Die Antwort des Dammes wurde mit einem umfassenden Messsystem bestehend aus Piezometern zur Erfassung des Porenwasserdruckes, aus EnviroSmart- und TDR-Sonden zur Messung des volumetrischen Wassergehalts und von Tensiometern zur Messung der Saugspannung erfasst. Die Witterungsdaten wurden durch eine Meteostation registriert. Während der Versuchsdauer von 425 Tagen wurde der Damm mehrmals durch hohe Wasserstände belastet und ein 3-tägiger Beregnungsversuch durchgeführt.

Der durchgeführte Feldversuch brachte u. A. folgende Erkenntnisse:

- der Sättigungszustand des Dammes bei einer Beanspruchung durch ein Hochwasserereignis hat einen massgebenden Einfluss auf das Dammverhalten. Bei einem niedrigen Sättigungsgrad, findet kurz- bis mittelfristig keine Durchströmung des Dammes statt. Befindet sich der Damm, sei es durch Hochwasserereignisse oder durch anhaltende Niederschläge, in einem höheren Sättigungszustand, kann der Damm in wenigen Stunden durchströmt werden, was die Stabilität der landseitigen Böschung erheblich reduzieren kann.
- Der Einfluss der Niederschläge beschränkt sich im Fall eines trockenen Dammes auf die oberflächennahen Schichten. Mit steigender Sättigung des Dammkörpers werden auch die tieferen Schichten von der Wassergehaltzunahme betroffen.
- Die Erholungszeit nach einem Ereignis steigt auch mit dem Sättigungsgrad. Je feuchter der Damm, umso mehr Zeit braucht es, bis das Wasser drainieren oder durch Evapotranspiration entweichen kann.

Mit den Messresultaten des Feldversuches konnten 11 Feld-Wasserretentionskurven bestimmt werden. Die Kurven liegen in einem relativ engen Band zusammen. Eine Hysterese zwischen Desorptions- und Absorptionskurven, wie sie in beiden Laborversuchen (Fredlund-Zelle) festgestellt wurde, ist anhand der Feldmessungen nicht feststellbar.

Parallel dazu wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, in denen neben den üblichen Klassifikationsversuchen auch die Wasserretentionskurven mehrerer Proben bestimmt werden konnten. Mit Hilfe der Korngrößenverteilungskurven wurden noch Wasserretentionskurven und ungesättigte Durchlässigkeitsbeiwerte anhand verschiedener Methoden rechnerisch bestimmt. Der Vergleich der im Feld und im Labor gemessenen und der rechnerisch mit Hilfe der Korngrößenverteilungen bestimmten Wasserretentionskurven lieferte folgende Erkenntnisse: die mit der Modified Kovacs Methode (Aubertin et al., 1998) berechneten Kurven stimmen am besten mit den Feld-Wasserretentionskurven überein. Die in den Laborversuchen gemessenen Wasserretentionskurven können gut mit der Methode nach Arya & Paris (1981) angenähert werden. Wenn keine Feldmessungen vorliegen, wird die Verwendung der Modified Kovacs Methode (Aubertin et al., 2003) für die Bestimmung der Wasserretentionskurve empfohlen.

Im Hinblick auf die numerische Modellierung sind noch die Durchlässigkeitsbeiwerte nach Kozeny-Carman (Kozeny, 1927; Carman, 1956) und nach Chapuis (2004) bestimmt worden. Die ungesättigten Durchlässigkeitsbeiwerte sind anschliessend nach Fredlund & Xing (1994) sowie nach van Genuchten (1980) berechnet worden. Dabei hat sich gezeigt, dass die erste Methode eine bessere Übereinstimmung mit den Laborresultaten ergibt.

Die gewonnenen geotechnischen Eigenschaften dienen als Eingangsparameter für die numerische Modellierung des Feldversuches mit der Methode der Finiten Elemente. Die Modellierung des Feldversuches ergab Resultate, die mit den Messungen gut, zum Teil sehr gut, übereinstimmen. Ungeachtet der Streuung der Bodenkennwerte (Korngrößenverteilungen, Dichte, Durchlässigkeitsbeiwerte) und der Unsicherheiten bezüglich geologischen Aufbaus konnte die Modellierung ein befriedigendes Bild des Dammverhaltens unter wiederholter Hochwasserbelastung und wechselnder Witterung wiedergeben. Somit hat die eingesetzte Software ihre Eignung zur Berechnung solcher Probleme bestätigt.

Durch die Berechnungsergebnisse werden sowohl die Eignung der Berechnungsmethode als auch die Qualität der mit unterschiedlichen Methoden bestimmten Bodenkennwerte voll bestätigt. Somit sollte das Vertrauen in die Relevanz der ungesättigten Bodenmechanik für die praxisbezogene geotechnische Analyse wachsen. Mit der Eignungsbestätigung der vereinfachten Bestimmung der Wasserretentionskurven ist auch ein bedeutender Nachteil in Bezug auf die Anwendung der ungesättigten Bodenmechanik aus dem Weg geräumt.

Diese Arbeit untersuchte nur den Problembereich Strömung liefert aber mit den gemessenen und berechneten Wasserretentionskurven die Basis für die Behandlung der Problembereiche Scherfestigkeit und Verformungsverhalten.

Da alle untersuchten Böden granular und nicht-plastisch waren, sind die Schlussfolgerungen vor einer Anwendung bei tonigen Böden zu überprüfen. Weitere Untersuchungen in diesem Bereich, z.B. über die Anwendung der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Wasserretentionskurve der feinkörnigen, plastischen Böden, werden empfohlen. Ebenfalls emp-

fehlerhaft wären Arbeiten, die die Übertragung der Laborresultate auf die Feldbedingungen ermöglichen.

Unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit gewonnenen Kenntnisse sollten die von Fredlund & Houston (2009) aufgestellten Protokolle für die Bestimmung der Funktionen der ungesättigten Bodenparameter in der Praxis grösseren Bekanntheitsgrad erlangen.

Abstract

The flood events of the last decades clearly showed the existing limits of flood protection system. The analysis of the future impacts of climate change reveals a possible, further increase in flood risk. River levees, dams or dykes are an important part of the flood protection system, yet they date from the 19th century and no longer reflect the current state of the art. There is urgent need to take action after having prioritized the measures to be applied according to the potential hazards. In this regard, additional knowledge of the behaviour of river dams under repeated exposure to high water levels and changing weather is necessary.

The reaction of a river dam to water level fluctuations and weathering is a complex transient process in a structure made from unsaturated geomaterials, which can only be computed by using theories describing unsaturated soil mechanics. In the present work, therefore, a field test was conducted to monitor the dam reaction to the loading applied by repeated high water levels and changing weather conditions and also to define the unsaturated soil properties in situ.

A 12.5 m long section of the Rhone dam near Visp (VS) was isolated for the field studies by a sheet pile cell, in which artificial flood conditions were achieved by filling the cell on the water side. The response of the dam was recorded with a comprehensive measurement system, consisting of piezometers for measuring the pore water pressure, of EnviroSMART and TDR probes to measure the volumetric water content and of tensiometers for measuring the suction. The meteorological data were recorded by a weather station. The dam was repeatedly loaded by high water levels during the experimental period of 425 days, and a 3-day irrigation experiment has been conducted as well.

Observations and results of the field test led to the following findings:

- The degree of saturation of the various soil zones during a flood event has a decisive influence on the dam behaviour. No flow will take place through the dam in the short to medium term when the degree of saturation is low. If the dam is in a higher state of saturation either through early floods or prolonged rainfall, seepage flow can penetrate through in a few hours, which can significantly reduce the stability of the landside slope.
- The influence of rainfall is limited to the near-surface layers when the dam is dry. With increasing saturation of the dam body, the deeper layers also become affected by rainfall infiltration leading to an increase in the water content.
- The recovery time after an event also increases with increasing degree of saturation. The wetter the dam, the more time it takes for the water to drain or evaporate.

Eleven field-water retention curves were determined from the measurement results obtained from the field test. The curves lie in a relatively narrow band. Hysteresis between desorption and absorption curves, as was observed in both experiments in the Fredlund cell, could not be determined from the field measurements.

In parallel, laboratory tests were performed in which the water retention curves could be determined for several specimens in addition to the usual classification experiments. Water retention curves and unsaturated hydraulic conductivities were derived from the grain size

distribution curves using various methods. Comparison between the water retention curves measured in the field and in the laboratory, and the water retention curves computed using the particle size distributions provided the following findings: the curves calculated with the modified Kovacs method (Aubertin et al., 1998.) match best with the water retention curves measured in the field. The laboratory experiments are better approximated by the method of Arya and Paris (1981). If no field measurements are available, the use of the Modified Kovacs method for the determination of the water retention curve is recommended.

With regard to the numerical modelling the permeability coefficients have been determined after Kozeny-Carman (Kozeny, 1927; Carman, 1956) and Chapuis (2004). The unsaturated hydraulic conductivities have then been calculated after the empirical relationships proposed by Fredlund & Xing (1994) and by van Genuchten (1980), the first method giving a better agreement with the laboratory results.

The geotechnical properties obtained were used as input parameters to model the field test numerically with the finite element method. The modelling results showed a good, to a very good, agreement with the field measurements. Despite the variation of the soil properties (particle size distribution, density, permeability coefficients) and the uncertainties in modelling the geological strata, the calculations could give a satisfactory image of the dam behaviour under repeated high water levels and changing weather conditions.

Considering these results, both the suitability of the calculation method and the quality of the unsaturated soil parameters determined from different methods have been fully confirmed and the confidence in the relevance of unsaturated soil mechanics for practical geotechnical analysis should be able to grow. A significant disadvantage for the application of theories of unsaturated soil mechanics in practice is cleared out of the way with confirmation of the suitability of the simplified determination of the water retention curves.

This thesis has investigated the seepage through and below the dam only, but the measured and calculated water retention curves provide the basis for the treatment of other types of geotechnical engineering analyses based on shear strength and volume change behaviour to guarantee slope stability (ultimate limit state) and acceptable deformations (serviceability limit state).

Since all investigated soils were granular and non-plastic, the conclusions should be checked before applying them to clayey soils. Further studies in this area, e.g. on the application of the various methods for determining the water retention curve of the fine-grained, plastic soils, are recommended. Also recommended are further research projects that enable the transmission of laboratory results to field conditions. Taking account of the knowledge gained in this work, the protocols established by Fredlund & Houston (2009) for the assessment of the unsaturated soil properties should be disseminated more widely in practice.