

# Anwendung eines vereinfachten dynamischen Untersuchungsverfahrens auf einen Steinschüttdamm mit Lehmdichtungskern

*Dimitar Kisliakov und Ognyan Todorov*

## Zusammenfassung

Trotz der intensiven Entwicklung anspruchsvoller dynamischer Analyseverfahren und deren Umsetzung im Bereich des Dammbaus in den letzten Jahrzehnten werden auch vereinfachte Ansätze immer noch weiterentwickelt, da sie eine schnelle und genug zuverlässige Abschätzung entscheidender Antwortparameter eines Dammes unter Erdbebeneinwirkung ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Fallstudienanwendung eines vereinfachten dynamischen Analyseverfahrens auf einen bulgarischen Steinschüttdamm mit klassischem Dichtungskern aus Lehm. Die erhaltenen Ergebnisse werden mit den Ergebnissen der dynamischen Untersuchung im Zeitbereich für denselben Damm verglichen, die mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt wurden. Aufgrund dieses Vergleiches werden Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit des verwendeten vereinfachten Verfahrens für schnelle Abschätzungen der dynamischen Antwortparameter von solchen Bauwerken unter Erdbebeneinwirkung gezogen, insbesondere bei Variantenvorstudien.

## 1 Einleitung und Problemstellung

Im 21. Jahrhundert ist die Rechenleistung sogar der Personalcomputer bereits bemerkenswert hoch, und diese Systeme sind immer leichter zugänglich. Außerdem werden ausgefeilte Methoden zur statischen und dynamischen Analyse komplizierter Bauingenieursysteme mit komplexen physikalischen Wechselwirkungen kontinuierlich weiterentwickelt und ihre programmtechnische Implementierung immer intuitiver und benutzerfreundlicher. Diese Situation ist insbesondere im Bereich des Dammbaus zu beobachten, wo die angesprochene Gesamtentwicklung bereits eine wesentlich wirklichkeitsnähere Modellierung komplexer physikalischer Phänomene ermöglicht, wie z.B. Strukturwechselwirkungen, Bodenverflüssigung, dynamische Sickerprobleme usw.

Trotz der intensiven Entwicklung sowohl anspruchsvoller dynamischer Analysemethoden als auch deren Hard- und Softwareimplementierung im Bereich des Dammbaus in den letzten Jahrzehnten werden vereinfachte Methoden zur kostengünstigen, schnellen und dennoch zuverlässigen Bewertung wichtiger Antwortparameter eines Dammbauwerkes auf maßgebende Belastungen und Einwirkungen weiterentwickelt und zu unabhängigen Kontroll- und Vergleichszwecken angewandt. Als Beispiele sind hier in diesem Zusammenhang die Arbeiten von *Jansen* (1990), *Xu Zhi-Ying* (1996) und *Shen Zhen-Zhong, Xu Zhi-Ying* (1996) zu nennen. Sie dienen der Berechnung bestimmter Antwortparameter des Staudammes (Grundperiode, Setzung, u.a.). Besonderes Augenmerk wird auf die ständig weiterentwickelte pseudostatische Ersatzkraftmethode gelegt, da sie eine schnelle und einfache Abschätzung einiger Antwortparameter des Absperrbauwerkes bei Erdbebeneinwirkung ermöglicht. Hier ist insbesondere eine Reihe von Arbeiten von *Herzog* (1985, 1992) zu nennen, die speziell dieser Fragestellung gewidmet sind. Die persönliche Erfahrung der Autoren mit der Anwendung der dort erarbeiteten Vorgehensweise, *Kisliakov* (2017), zeigt, dass die Ergebnisse realistisch genug sind und als eine zuverlässige Grundlage bei vorläufigen Abschätzungen dienen können.

Eine besondere Aufmerksamkeit in diesem Zusammenhang gebührt dem neulich von den französischen (CFBR) und japanischen (JCOLD) Talsperrenkomitees entwickelten und validierten nichtlinearen dynamischen vereinfachten Analyseverfahren für Staudämme unter Erdbebeneinwirkung, *Fry, Jellouli, des Garets*, (2018, 2019). Mit Hilfe dieses Verfahrens werden alle wichtigsten Phänomene beim tatsächlichen dynamischen Verhalten von Staudämmen erfasst. Wichtig ist es auch, dass bei der Entwicklung des vorgeschlagenen Berechnungsverfahrens die Daten von 86 Aufnahmen an 23 Staudämmen berücksichtigt worden sind, *Fry, Jellouli, des Garets*, (2018). Leider kann aber aufgrund der uns verfügbaren Veröffentlichungen zu dieser Methode das vollständige Rechenverfahren noch nicht anwendungsreif nachgebildet werden.

Generell kann die Anwendung mehr oder weniger vereinfachter Methoden in vielen Fällen wichtig sein für:

- vorläufige Bewertung der wichtigsten Dammantwortparameter für verschiedene Last- und Einwirkungsfälle und Orientierung über den Inhalt und die Tiefe des weiteren Vorgehens auf Grundlage der so erhaltenen Ergebnisse;
- unabhängige qualitative Kontrolle der Ergebnisse durch anspruchsvollere Analysen, durchgeführt aufgrund komplexer Modelle.

In diesem Beitrag wird eine Anwendung des von *Xu Zhi-Ying* (1996) vorgestellten vereinfachten Berechnungsverfahrens am Beispiel eines sich im Bau befindenden bulgarischen Steinschüttdammes mit Lehmdichtungskern gezeigt. Der Sonderfall dieses Dammes wurde hauptsächlich aus zwei Gründen ausgewählt. Einerseits wurde die genannte vereinfachte Methode vom Autor in der genannten Quelle auf einen Erdschüttdamm angewandt, der sich in einem relativ engen dreieckigen Tal befindet. Andererseits ist das Verhältnis der Kronenlänge zur Dammhöhe etwa 4, *Xu Zhi-Ying* (1996), d.h. der räumliche Charakter der Antwort des Dammkörpers auf Erdbebeneinwirkung ist dabei berücksichtigt. Es war für uns interessant, wie dieser Ansatz für einen Steinschüttdamm (Schotterdamm), der sich in einem wesentlich breiteren Tal befindet (Verhältnis der Kronenlänge zur Dammhöhe etwa 10), gilt. In diesem Zusammenhang wird des Weiteren dieses Berechnungsverfahren auch nur für den zentralen Dammquerschnitt angewandt. Andererseits existiert bereits die technische Planung, und somit besteht auch die Möglichkeit eines Vergleiches mit den Ergebnissen von anspruchsvollen Berechnungen, die eine Einschätzung der Anwendbarkeit des diskutierten vereinfachten Ansatzes erlauben.

## **2 Fallstudie und Umsetzung des vereinfachten Verfahrens**

### **2.1 Vorstellung des Staudammes**

Der betrachtete Damm ist kein typischer Steinschüttdamm, sondern eher ein Schotterdamm. Sein Körper besteht tatsächlich aus zerkleinertem Gestein, sogar mit ähnlichen physikalischen Parametern wie denen der Filter. Die Planungs- und Standortuntersuchungsarbeiten des Staudammes wurden in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt, am Ende der 1980er Jahren begann auch die Bauausführung. Im Sommer 2001 wurde der Bau des teilweise gebauten Staudammes (bis zu etwa einer Höhe von 27 m) und der dazugehörigen Einrichtungen plötzlich eingestellt. Derzeit wird der Damm fertiggestellt mit der Hauptaufgabe, den geplanten Trinkwasserspeicher mit seinen Anlagen in Betrieb zu nehmen. Aufgrund der großen zeitlichen Lücke wurden neue Standortuntersuchungen und die Neugestaltung des Staudammes und aller Einrichtungen von einem Ingenieurbüro durchgeführt. Die Draufsicht und der höchste Querschnitt des Dammes mit beiden Zonen – der bereits gebauten und der neu zu errichtenden oberen – sind in Abb.1 und Abb. 2 dargestellt.





**Abb. 3** Damm mit Baustelle zur Fertigstellung 2019



**Abb. 4** Die Baustelle zur Fertigstellung des Dammes 2019

Die wichtigsten Konstruktionsparameter des Dammes sind wie folgt:

- Typ: Steinschütt- / Schotterdamm mit Leimdichtungskern und Filterzonen
- Höhe: 47,00 m (maximal, von der Gründung des Dichtungskernes bis zur Krone)
- Kronenlänge: 458 m
- Kronenbreite: 6,00 m
- Gesamtvolumen des Speichers bei maximalem Wasserspiegel: 20 000 000 m<sup>3</sup>
- Gesamtvolumen des Dammkörpers: ~660 000 m<sup>3</sup>
- Hochwasserentlastung: Stirnüberfall mit Schussrinne und Tosbecken am linken Hang

Gemäß den Anforderungen der bulgarischen nationalen Normen für die Planung von Wasserbauwerken gehört der Damm als Bauwerk zur Bauwerkklasse II, d.h. zur zweithöchsten Klasse.

Gemäß der bulgarischen nationalen Norm für die Planung von Gebäuden und Anlagen in Erdbebengebieten (Verordnung № RD-02-20-2) befindet sich der Standort in einer Zone der Intensitätsstufe VIII (MSK) mit einer maximalen Bodenbeschleunigung von  $0,15g$ , die einer Wiederkehrperiode von 1000 Jahren entspricht.

## 2.2 Übersicht und Anwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens

Das hier angewandte Berechnungsverfahren wurde von *Xu Zhi-Ying* (1996) ausführlich beschrieben und mit einem Zahlenbeispiel illustriert. Es besteht im Allgemeinen aus den folgenden Schritten:

1. Ermittlung der statischen Spannungen im Dammkörper. Danach werden die vertikalen effektiven, die horizontalen effektiven und die mittleren effektiven Anfangsspannungen ermittelt. Am einfachsten können die genannten Spannungen aus der hydrostatischen Last mit Berücksichtigung der Querdehnungszahl der den Dammkörper aufbauenden Böden ermittelt werden.
2. Gemäß den durchschnittlichen vertikalen effektiven Spannungen und der in *Xu Zhi-Ying* (1996) angegebenen Kurve des Schubspannungsverhältnisses gegenüber Zyklen bis zur Verflüssigung, und unter Annahme einer durchschnittlichen Schubspannung (hier:  $15 \text{ kPa}$ ) wird die Anzahl der Lastzyklen bis zur Verflüssigung  $N_L$  erhalten. In Abhängigkeit von der zu erwartenden Erdbebenmagnitude kann die äquivalente Anzahl von Zyklen  $N_{eq}$  von der in *Xu Zhi-Ying* (1996) angegebenen Tabelle entnommen werden. Dabei haben wir auch annähernde Beziehungen zwischen Magnitude und Intensität benutzt.
3. Nach dem Erhalten von  $N_L$  und  $N_{eq}$  kann der seismische Porenwasserdruck bestimmt werden. In der dafür anzuwendenden Gleichung wird ein zusätzlicher Parameter aus *Hardin, Drnevich* (1972) benutzt. Im gegebenen Fall besteht aufgrund der Korngrößen der eingebauten Materialien keine Verflüssigungsgefahr.
4. Wenn der Porenwasserdruck und die mittlere effektive Anfangsspannung bekannt sind, können die mittlere effektive Spannung sowie der maximale Schubmodul berechnet werden.
5. Unter der Annahme einer mittleren Schubdehnung (hier:  $0,1\%$ ) werden der Schubmodul und der Dämpfungsgrad berechnet.
6. Berechnung der Scherwellengeschwindigkeit  $V_s$ .
7. Berechnung der Grundeigenperiode des Dammes  $T_1$ , z.B. nach *Papazhev u.a.* (1991).
8. Aufgrund der erhaltenen Grundperiode und Dämpfungsgrad können aus dem Antwortspektrum des Eingabezeitablaufes der Bodenbeschleunigung der entsprechende Spektralwert der Bodenbeschleunigung und die resultierende Beschleunigung an der Dammkrone im mittleren Querschnitt berechnet werden. Hier sollte erwähnt werden, dass in der bulgarischen Erdbebennorm *Verordnung* (2012) nur ein Bemessungsspektrum der Beschleunigungen angegeben ist, und keine Zeitabläufe der Bodenbewegungsgrößen. Es gibt aber Hinweise, wie solche künstlich generiert werden können. Zum Zweck der Dammplannung wurden im Rahmen einer speziellen Untersuchung drei solche spektrumkompatible Bodenbeschleunigungsabläufe generiert. Das Antwortspektrum eines dieser Zeitabläufe wurde bei dieser beispielhaften Berechnung benutzt. Leider kann man nicht direkt mit dem in der *Verordnung* (2012) angegebenen Bemessungsspektrum der Beschleunigungen arbeiten, sondern muss das

Antwortspektrum des künstlich generierten spektrumkoptatiblen Beschleunigungszeitablaufes benutzt werden, weil dabei mehrere unterschiedliche Werte des Dämpfungsgrades gebraucht werden.

9. Berechnung der durchschnittlichen Schubverformung und der durchschnittlichen Schubspannung.
10. Sind die so erhaltenen Werte gleich (mit einer bestimmten Genauigkeit) mit den oben angenommenen Werten der selben Größen, kann der iterative Rechenvorgang abgeschlossen werden. Ansonsten werden Punkte 2. und entsprechend 5., bis 9. wiederholt bis zur Befriedigung eines als Konvergenzbedingung vorgegebenen Genauigkeitskriteriums.

### 3 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der iterativen Berechnung sind in Tabellenform in Tab.1 dargestellt. Dort sind die Größen eingeordnet, die im Laufe des Rechenvorganges ermittelt wurden.

**Tab. 1** Ergebnisse der iterativen Berechnung

Iteration Nr.	Maximale Beschleunigung an der Dammkrone	$T_1$	durchschnittliche Schubverformung	durchschnittliche Schubspannung
	[g]	[s]	[%]	[kPa]
1	0,29424	0,749719	0,0369	11,700
2	0,40458	0,578166	0,022	11,700
3	0,42297	0,529344	0,0184	11,700
4	0,44136	0,51708	0,0176	11,700
5	0,45975	0,514126	0,0174	11,700
6	0,47814	0,513422	0,0173	11,700
7	0,47814	0,513255	0,0173	11,700

Diese Werte werden im Folgenden mit denjenigen aus den Planungsunterlagen verglichen.

- Grundperiode: Die durchgeführte FEM-Berechnung des Zentralquerschnittes, d.h. nur zweidimensional, hat eine Grundperiode von 0,40 s geliefert. Diese Eigenperiode des Dammkörpers wäre in Wirklichkeit etwas höher, vor allem durch den Einfluss des breiten Tals. Auf der anderen Seite haben die vorläufigen Naturuntersuchungen der Dammbaustelle eine mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Scherwellen von 350 m/s ergeben. Somit läge die Grundperiode des Dammes bei 0,352 s, allerdings auch zweidimensional betrachtet, d.h. der festgestellte Unterschied bei der Grundperiode ist relativ groß.
- Beschleunigung an der Dammkrone: Das ist der andere Parameter, der direkt verglichen werden kann. Die FEM-Berechnung der Antwort des Staudammes auf eine Einwirkung in der Form eines Bodenbeschleunigungsablaufes hat für den selben spektrumkompatiblen generierten Beschleunigungsablauf, der auch mit der vereinfachten Methode benutzt wurde, für den mittleren Punkt der Krone im Zentralquerschnitt 0,317g geliefert. Das vereinfacht ermittelte Endergebnis der Iteration 0,478g unterscheidet sich wesentlich von diesem Wert, allerdings auf der sicheren Seite. Der Unterschied ist groß, und obwohl der Dammkörper in diesem Fall relativ „steif“ ist, kann eine solche Verstärkung der Eingabebeschleunigung (max. 0,15g) an der Dammkrone kaum realistisch sein. Es konnte allerdings mit den Rechenergebnissen mit dem FE-Modell aufgrund von drei gleichwertigen spektrumkompatiblen Eingabeabläufen

der Beschleunigung festgestellt werden, dass viele andere Faktoren dabei auch einen entscheidenden Einfluss haben – sowohl beim Aufbau des numerischen Modells, als auch bei der mit ihm durchgeführten FE linearen dynamischen Untersuchung.

Zu der durchschnittlichen Schubverformung und zur durchschnittlichen Schubspannung kann leider keine eindeutige Meinung getroffen werden, da diesen Größen bei den durchgeführten dynamischen FE-Berechnungen während der Planung keine spezielle Aufmerksamkeit geschenkt wurden. Leider können keine vergleichenden Nachweise genannt werden. Es fällt aber auf, dass auch im nachgerechneten Zahlenbeispiel von *Xu Zhi-Ying* (1996) diese Werte von denjenigen in der Veröffentlichung abweichen. Die durchschnittliche Schubspannung bleibt auch dort bei der Nachrechnung konstant.

#### 4 Schlussbetrachtung

Die oben dargestellte Anwendung eines vereinfachten Ansatzes zur seismischen Antwort eines Steinschüttdammes kann sehr effizient in Bezug auf die Möglichkeit sein, in relativ kurzer Zeit eine Orientierung über quantitative Werte von Schlüsselparametern des dynamischen Dammverhaltens zu gewinnen. Solche Ergebnisse sind besonders wertvoll, wenn die erhaltenen Werte realistisch sind. Letzteres lässt sich in vielen Fällen durch einen Vergleich mit Messwerten oder mit Ergebnissen wirklichkeitsnäherer Berechnungen nachweisen. Und umgekehrt, vereinfachte Ansätze dienen häufig der unabhängigen Kontrolle von anspruchsvolleren Rechenverfahren über die Größenordnung der Ergebnisse.

Allerdings sind solche Vergleichsmöglichkeiten in vielen Fällen schlichtweg nicht vorhanden. Gerade in solchen Fällen ist eine vorläufige realistische Einschätzung besonders wichtig. Dann kann die Anwendung vereinfachter Ansätze zum Problem werden. In diesem Zusammenhang sollten folgende Überlegungen berücksichtigt werden:

- Die erhaltenen Ergebnisse sollten mit großer Vorsicht betrachtet, und wenn möglich, unabhängig geprüft werden. Liegen Messungen und/oder rigorose Rechenmodelle nicht vor, ist ein unabhängiger Vergleich mit ähnlichen Fällen, Daten aus Literaturquellen usw. unumgänglich;
- Die jedem vereinfachten Verfahren zugrundeliegenden Annahmen und Modellbesonderheiten sollten entsprechend berücksichtigt werden;
- Eine reiche fachliche Erfahrung auf dem Gebiet ist unentbehrlich;
- In Bezug auf den in dieser Arbeit angewandten vereinfachten Rechenansatz würden wir soweit seine Anwendung für eine Abschätzung des dynamischen Verhaltens von Staudämmen in breiten Tälern nicht empfehlen, insbesondere wenn der Dammkörper relativ steifer ist. Besonders empfehlenswert wären auch weitere Vergleichsuntersuchungen mit fortgeschrittenen Rechenmodellen unterschiedlicher Dammbauwerke zur genaueren Abschätzung des möglichen Anwendungsbereiches dieses vereinfachten Rechenverfahrens.

#### Literatur

- Jansen, R.B. (1990). Estimation of embankment dam settlement caused by earthquake, *Water Power & Dam Construction*, December 1990, 35-40
- Shen Zhen-Zhong, Xu Zhi-Ying. (1996). Shear vibration of 3-D inhomogeneous earth dams in triangular canyons, Paper No.584, 11<sup>th</sup> WCEE, Acapulco, Mexico
- Xu Zhi-Ying. (1996). Simplified effective stress procedure for evaluating seismic response of earth dams in 3-D, Paper No.528, 11<sup>th</sup> WCEE, Acapulco, Mexico

- Herzog, M. (1985). Closed formulae for earthquake-induced deformations in dams, *Water Power & Dam Construction*, January 1985, 33-34
- Herzog, M. (1992). Eigenschwingungsdauer sowie dynamischer Gleitmodul von Erd- und Steinschüttdämmen, *Bautechnik*, 69, Heft 9, 515-517
- Herzog, M. (1992). Zutreffende Erdbebenbemessung von Talsperren mit einem verbesserten statischen Ersatzlastverfahren, *Österreichische Wasserwirtschaft*, Jahrgang 44, Heft 1/2, 15-22
- Herzog, M. (1992). Der Bruch des Sheffield-Dammes in Santa Barbara beim Erdbeben am 29. Juni 1925 im Rückblick, *Österreichische Wasserwirtschaft*, Jahrgang 44, Heft 7/8, 206-208
- Kisliakov, D.S. (2017). Very simplified seismic response evaluation of an asphalt core rock-fill dam – its possibilities and limits, *Proc. 4<sup>th</sup> Congress on Dams*, organized by MACOLD, 28.-30. September 2017, Struga, Republic of N. Macedonia, ISBN 978-608-65373-6-4, 31-38
- Fry, J.-J., Jellouli, M., des Garets, A. (2018). The FR-JP simplified dynamic analysis – development and validation, in: Fry and Matsumoto (Eds.) *Validation of Dynamic Analyses of Dams and Their Equipment*, CIGB/ICOLD, ISBN 978-1-138-59017-5, 255-273
- Jellouli, M., des Garets, A., Fry, J.-J. (2019). Méthode de calcul dynamique simplifiée FR-JP – Développement et qualification sur études de cas, *Colloque CFBR: Justification des barrages : Etat de l'art et Perspectives*, Chambéry, 27 et 28 novembre 2019
- Todorov, O.K. (2014). Municipality infrastructure development project No. MIDP-D-QCBS-1, Design for completing the dam and shaping the dam crest, *Technological design*, October 2014
- Verordnung № RD-02-20-2 vom 27. Januar 2012 über die Planung von Gebäuden und Anlagen in Erdbebengebieten, Ministerium für regionale Entwicklung und Raumplanung, Sofia, Bulgarien (In Bulgarisch)
- Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1972). Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, July 1972, 667-692
- Papazhev, I.B., Abadzhiev, Hr.B., Sheytanova, L.V., Toshev, D.N. (1991) *Anleitung zur Planung von Wasserbauten (In Bulgarisch)*. Tehnika, Sofia

## **Anschrift der Verfasser**

Prof. Dr.-Ing. Dimitar Kisliakov  
Lehrstuhl für Wasserbau und landwirtschaftlichen Wasserbau, UACEG  
Boul. Hr.Smirnenski 1, BG-1046 Sofia, BULGARIEN  
kiss\_fhe@uacg.bg

Dipl.-Ing. Ognyan Todorov  
Aquapro Engineering EOOD,  
Block 27, Entr. A, Floor 3, App. 5, Darvenitsa, Sofia, BULGARIEN  
aquapro.eng@gmail.com