

Nichtlineare dynamische Untersuchung einer 70 Jahre alten Gewichtsstaumauer in Bulgarien

Dimitar Kisliakov und Ognyan Todorov

Zusammenfassung

Die Schwergewichtsmauer „Beli Iskar“ in Bulgarien wurde im Zeitraum 1936 – 1945 im Rila Gebirge zur Trinkwasserversorgung der Hauptstadt Sofia errichtet. Sie stellt ein typisches Beispiel für die s.g. Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) dar, die zu einer starken Beeinträchtigung der Eigenschaften des Staumauerbetons durch das Schneeschmelzwasser in der vergangenen Betriebszeit geführt hat. In letzter Zeit war die Staumauer wegen ihrer höchsten Werkklasse Gegenstand zahlreicher Untersuchungen sowie mancher Reparaturen – vor etwa 13 Jahren wurde die wasserseitige Oberfläche mit einer Kunststoffdichtungsbahn aus PVC als erste Phase ihrer konstruktiven Renovierung verkleidet, und der Kontaktbereich des Felsuntergrundes wurde injiziert. Die gestellten dabei Ziele wurden erreicht, aber der allgemeine Zustand der Staumauer erfüllt leider noch nicht die heutigen dieser Werkklasse zugehörigen Anforderungen bezüglich der Talsperrensicherheit. Der Hauptpunkt dabei besteht in der Erdbebengefährdung, die zur Planungs- und Bauzeit gar nicht berücksichtigt wurde.

In der zweiten Phase der geplanten Sanierungsaktivitäten soll auch die Erdbebensicherheit der Staumauer auf den heutigen Stand gebracht werden. In diesem Jahrhundert wurden aufgrund der verfügbaren Eingabeinformation über die konkrete Staumauer umfangreiche dynamische Untersuchungen durchgeführt, allerdings mit dem Ziel, ihre Tragfähigkeit und Standsicherheit (inkl. seismisches Risiko) in Bezug auf die aktuellen Regelwerksanforderungen in Bulgarien abzuschätzen. Aufgrund der erhaltenen Ergebnisse wurden Varianten zur konstruktiven Befestigung der Mauer vorgeschlagen. Neulich wurde schon auch die konzeptuelle Planung zu diesem Zweck abgeschlossen, in der aufgrund rigoroser Berechnungen zwei konstruktive Lösungen erarbeitet wurden. In allen diesen Jahren haben die durchgeführten Untersuchungen vor allem für die Anforderungen der gültigen Regelwerken Rechnung getragen. Als Ergebnis ist bisher eigentlich keine nichtlineare Untersuchung der Staumauer auf Erdbebeneinwirkung unseres Wissens durchgeführt worden. Wir haben uns aber die Frage gestellt, wie das dynamische Staumauerverhalten der bestehenden Staumauer ausschauen würde, wenn sie einem gerade für ihre Stelle ermittelten Bemessungsbeben ausgesetzt wird.

Im Vortrag wird aufgrund eines physikalisch nichtlinearen Rechenmodells diese Frage beantwortet. Das Modell, die Einwirkungsparameter und die Ergebnisse werden ausführlich vorgestellt. Die letzteren zeigen deutlich, daß bei den getroffenen relativ konservativen Modellannahmen die Staumauer auch bei Wiederholperioden von 1000 und 10000 Jahren entsprechenden seismischen Einwirkungen (bezüglich Höchstbodenbeschleunigung), trotz intensiver Rißbildung in der Kontaktfuge doch ihre Standfestigkeit nicht verliert. Die erarbeitete Konstruktion zur Mauerbefestigung wird auch vorgestellt, ihr wird aber weniger Aufmerksamkeit gewidmet, da sie ihre Aufgabe vollständig erfüllt, was für zwei konkret definierte Erdbebeneinwirkungen auch überprüft wurde.

1 Einleitung und Problemstellung

Nach 70 Jahren Betrieb unter härtesten Bedingungen im hohen Gebirge benötigt auch die am besten entworfene und ausgeführte Betonstaumauer bestimmte Sanierungsaktivitäten, damit die Betriebszuverlässigkeit für die kommenden Jahrzehnte ihres Betriebslebens sichergestellt werden kann. Umso mehr werden solche Maßnahmen benötigt, wenn die Staumauer den aktuellen Anforderungen in Bezug auf die Talsperrensicherheit entsprechen soll. Die Gewichtstaumauer „Beli Iskar“ im Rila Gebirge in Bulgarien ist schon 70 Jahre im Betrieb, Abb. 1, Abb. 2, und wenn diese Zeit von dem Baubeginn gerechnet wird – 79 Jahre. Diese Tatsache verlangt die Durchführung gründlicher Renovierungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Tragfähigkeit und Stabilität der Staumauer und somit auch zur Verlängerung ihres zuverlässigen Betriebslebens.



Abb. 1 Blick auf die Talsperre „Beli Iskar“

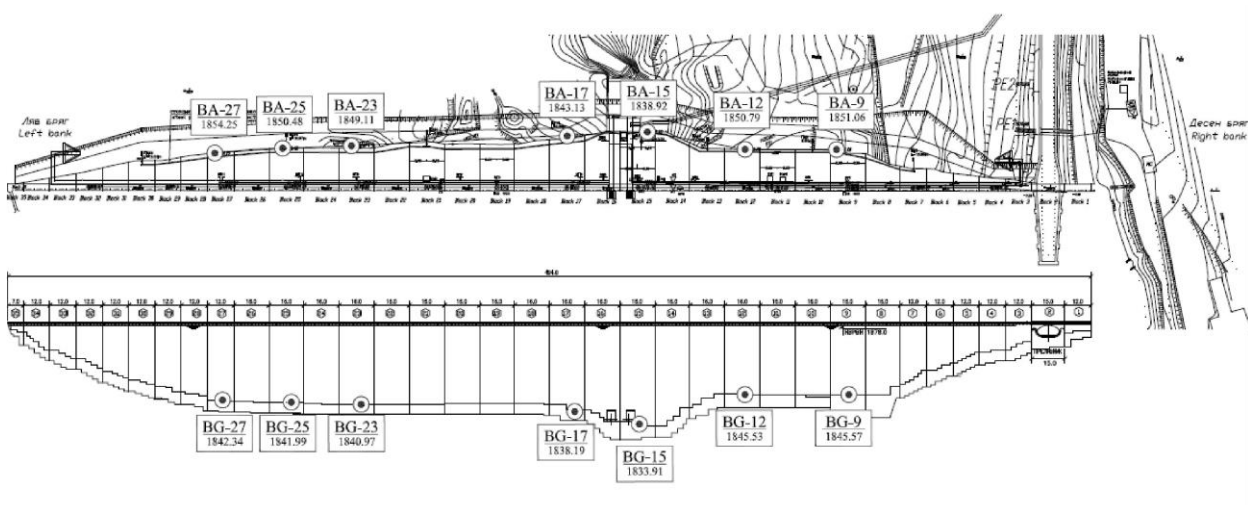


Abb. 2 Die Talsperre „Beli Iskar“: Draufsicht und Längsschnitt

Die Errichtung der Staumauer hat Anfang des Jahres 1936 begonnen. Die Planung wurde vorher sorgfältig durchgeführt, als Berater wurde der berühmte deutsche Statiker Prof. Dr.-Ing. A.Kleinlogel einbezogen. Nach dem ursprünglichen Vertrag sollte die Mauer innerhalb von vier Jahren fertig gebaut werden. In der Tat aber, während der Bauzeit von 1936 bis 1945 waren auf der Baustelle drei unterschiedliche Firmen tätig und mit unterschiedlicher Erfahrung im Talsperrenbau, insbesondere im hohen Gebirge. Dies bewirkte natürlich ungünstig die Qualität des eingebauten Mauerbetons. In dieser Zeit wurden die Bauarbeiten vom Oktober bis Mai wegen der harten Winterverhältnisse mit sehr niedrigen Temperaturen abgebrochen, allerdings ohne Konservierungsmaßnahmen für die schon ausgeführten Bauwerksteile. Letztendlich wurde die Staumauer von 1944 bis 1945 von der Gemeinde Sofia fertiggestellt und in Betrieb genommen.

Die Staumauer befindet sich im hohen Gebirge, auf Kote 1800, in einem Gebiet mit besonders schweren Wetterverhältnissen – Temperaturen im Winter bis -35°C , Eiswirkung und extrem weiches Schneeschmelzwasser, das zu einer intensiv ausgeprägten Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im langen Betriebsleben geführt hat, vor allem weil einfacher Portlandzement damals eingesetzt wurde. Nun sind an vielen Stellen die karbonisierten Ablagerungen schon mehrere [cm] dick. Die Verfahrenstechnik zum Einbau des Betons hat auch andere Schwachstellen der Mauerkonstruktion vorprogrammiert. Die Abdichtung wurde nur mit Handstampfen ausgeführt, wobei die schon monatealten Oberflächen nicht zusätzlich bearbeitet wurden. Das führte zur Bildung von unerwünschten Arbeitsfugen und Hohlräumen, durch die das Sicker- und Atmosphärenwasser sich in den Jahren immer tiefer ins Mauerinnere einarbeiten konnte. Zusätzlich konnten folgende weitere Schäden am Staumauerkörper festgestellt: Schäden an den Blockfugen, Lekagen überall im Kontrollgang mit karbonisierten Ablagerungen, Schäden an der Stahlbetonkonstruktion des Maschinenraums vom Grundablaß mit intensiv fortschreitender Korrosion der Bewehrung. Die wichtigsten Ursachen, die in den Jahren zur Qualitätsabminderung des Staumauerbetons geführt haben, sind die Alkaliereaktion und die Betonalterung. Diese Feststellung wurde auch durch die entnommenen Betonproben in den Jahren 1961, 1982, 1999 und 2012–2013 bestätigt, wobei Probekörper mit unterschiedlichem Alter untersucht wurden.

Ferner wurden die Drainagebohrungen im Maueruntergrund noch in den ersten 4–5 Jahren nach der Inbetriebnahme komprometiert. Von 1965 bis 2002 wurden dreimal neue Drainagebohrungen ausgeführt. Die vertikalen Drainagen im Staumauerkörper waren in 2002 schon verstopft. Das führt zur Entwicklung eines Filtrationsfeldes im inneren des Mauerkörpers, das absolut unzulässig ist, und zusätzlich das Spannungsfeld im Mauerkörper und die Stabilität des letzteren beeinträchtigt.

Neben den rein physikalischen Gründen einer dringend notwendigen Staumauersanierung gibt es noch einen wichtigen Grund, eine konstruktive Renovierung der Staumauerkonstruktion vorzunehmen. Zur Zeit der Errichtung der Staumauer hat es in Bulgarien noch keine Regelwerke über die Berücksichtigung seismischer Einwirkungen gegeben. Heutzutage ist es gut bekannt, daß Bulgarien sich in einem erdbebengefährdeten Gebiet befindet, und in den letzten Jahrzehnten hat sich auch die nationale Normung auf diesem Gebiet intensiv entwickelt (die letzte Ausgabe der nationalen Erdbebennormen ist aus 2012). Die Staumauer befindet sich nun in einem Gebiet der Intensitätszone IX mit Höchstbodenbeschleunigung (PGA) $0,27\text{ g}$, definiert für eine Wiederholperiode von 1000 Jahren. Weiter verschreiben die nationalen Normen, daß für Talsperren der höchsten Werkklasse, der auch diese Staumauer gehört, eine spezielle mikroseismische Untersuchung der Stelle zur Ermittlung der maßgebenden Eingabeparametern durchgeführt wird. Bei der neuesten seismischen Untersuchung der Staumauer, durchgeführt in den Jahren 2004-2006 und zitiert in *Prima Invest Konsult* (2013) wurde es festgestellt, daß die Stabilität der Staumauer bei seismischer Einwirkung nicht gewährleistet ist. Im Rahmen der genannten Studie wurde eine solche mikroseismische Untersuchung der Stelle sowie Analyse des seismischen Risikos durchgeführt. Mehrere Varianten zur konstruktiven Befestigung der Staumauer wurden erarbeitet, und von ihnen wurde dann die Lösung mit Befestigung der luftsetigen Oberfläche für weitere Entwicklung gewählt.

In der ersten Phase der nachfolgenden Sanierungsmaßnahmen wurde 2002 der Stausee entleert, und eine Kunststoffdichtungsbahn aus PVC wurde auf die Oberwasserseite verlegt, Abb. 3. Sanierungsarbeiten am Dichtungsschleier im Untergrund und am Drainagesystem wurden auch vorgenommen.



Abb. 3 Die Talsperre „Beli Iskar“: Oberwasserseite mit dem Überfall

In der zweiten Phase der Sanierungsmaßnahmen wurde nun von der Gemeinde der Hauptstadt Sofia die Erarbeitung einer Konzeptplanung in allen Fachbereichen für die konstruktive Sanierung der Staumauer und der zugehörigen Anlagen ausgeschrieben und vergeben. Im Rahmen dieser Planung, *Todorov (2015)*, wurde die notwendige Lösung in zwei Varianten entwickelt, und alle Nachweise mit den zugehörigen Berechnungen wurden durchgeführt.

In dieser ganzen Geschichte bleibt nur die Frage für uns immer noch offen, wie das dynamische Verhalten der Staumauer unter der maßgebenden Erdbebeneinwirkung mit Berücksichtigung der Entwicklung nichtlinearer Schadensmechanismen ausschauen würde. Es ist Tatsache, daß in allen bisherigen Untersuchungen konservative Modelle und Verfahren verwendet wurden, die vor allem normengerechte Schlußfolgerungen und zwar auf der sicheren Seite lieferten. Das ist auch aufgrund der angewandten Vorgehensstrategie zur Staumauer-sanierung vollkommen nachvollziehbar. Unseres Wissens wurde bisher aber keine nichtlineare dynamische Untersuchung am Modell der bestehenden Staumauer mit Berücksichtigung von Rißbildung und –fortpflanzung durchgeführt. Dieser Fragestellung ist nämlich unsere Arbeit hiermit gewidmet.

2 Nichtlineare dynamische Untersuchung der Staumauer

2.1 Erstellung und Parameter des Rechenmodelles

Im Rahmen dieses Beitrages wird ein 2-D Modell der Staumauer vorgestellt. Untersucht wurde als repräsentativ der Mauerblock Nr.17, der direkt neben den mittleren zwei Blöcken steht und im Unterschied zu ihnen kein Rohr oder Maschinenraum des Grundablasses unterbringt, Abb. 4. In der selben Abb. 4 ist auch die in der Planung von *Todorov (2015)* entwickelte konstruktive Sanierungslösung zu sehen, zu der wir aber hiermit später kommen. Wir haben uns somit maximal auf die Konstruktion des reinen Mauerquerschnittes konzentriert. Der Block wurde an seiner Kontaktfuge fest eingespannt im Untergrund angenommen, da der letztere aus homogenem mittel- bis grobkörnigem Biotitgranit mit sehr guten physikalischen Eigenschaften (Verformungsmodul, Festigkeit) besteht. Die wichtigsten Parameter der Talsperre sind wie folgt:

- Kote Mauerkrone: 1888,00 m.ü.NN
- Breite der Mauerkrone: 3,40 m

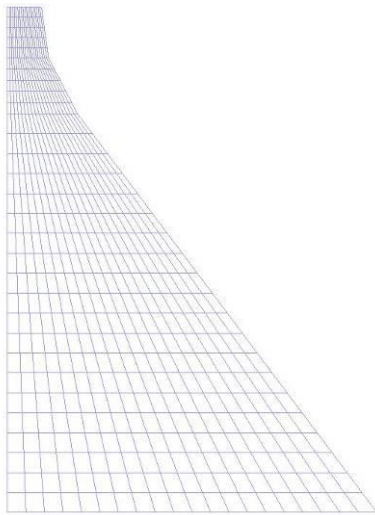


Abb. 6 FE-Netz des untersuchten Staumauerblockes

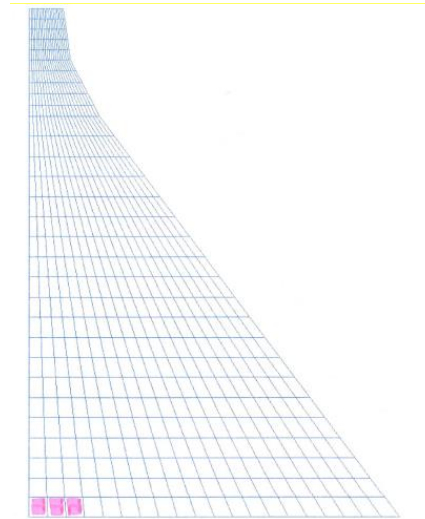


Abb. 7 Ermitteltes Rissprofil für das Erdbeben Pernik, skaliert auf PGA 0,305 g

2.2 Ermittlung der seismischen Einwirkungsparameter, Berechnungsfälle

Wie oben schon erwähnt, muss in Bulgarien für die Talsperren der höchsten Werkklasse, wie im betrachteten Fall, eine spezielle seismologische Studie für die konkrete Mauerstelle zur Ermittlung der seismischen Eingabeparameter durchgeführt werden. Im Rahmen einer solchen Untersuchung, durchgeführt in den Jahren 2004-2006 und benutzt laut *Prima Invest Konsult* (2013), sind Höchstbodenbeschleunigungswerte (PGA) und ihren zugehörigen Überschreitungswahrscheinlichkeiten in einem Jahr, entsprechend Wiederholungsperioden für die Staumauer „Beli Iskar“ als Mittelwerte formuliert, wie folgt (die Auswirkung des statistischen Vertrauensintervalls wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht):

- PGA = 0,305 g, 0,1%, entsprechend 1000 Jahre
- PGA = 0,564 g, 0,01%, entsprechend 10000 Jahre

Für die Zwecke der durchgeführten Planung und der hierigen Studie wurden auch entsprechend für das Gebiet der Talsperre maßgebende Zeitabläufe der Bodenbeschleunigungen benötigt. Die in der Staumauer eingebauten Geräte konnten leider keine zuverlässige Information liefern. Deshalb wurde eine spezielle Untersuchung zur Ermittlung solcher Eingabezeitabläufe, die sich genau auf die Staumauerstelle beziehen, durchgeführt, *Simeonov* (2015). Als Ergebnis dieser Untersuchung wurden zwei aktuelle Herde analysiert, die bekannt für ihre Aktivität in der Region sind: Pernik und die seit Jahrzehnten bekannte Verwerfung Krupnik. Repräsentative Aufnahmen von diesen zwei Herden am Rila Kloster wurden entsprechend bearbeitet und für die Zwecke des Projektes zur Verfügung gestellt. Dieses berühmte Kloster befindet sich in Luftlinie nur 15 km von der Talsperre entfernt, außerdem waren die dort aufgenommenen Signale in die drei räumlichen Richtungen auf Felsboden registriert, was am besten den örtlichen Verhältnissen an der Staumauer entspricht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben wir diese zwei Aufnahmen weiter auf die oben genannten PGA-Werte skaliert, und zwar mit Hilfe des Programmes PRISM und des dort implementierten Verfahrens, *Seong-Hoon Jeong u.a.* (2016), Abb. 8, Abb. 9. Wir haben nur eine Komponente von jeder dieser beiden Aufnahmen genommen, das war jeweils die O-W Komponente in den beiden Fällen, da sie die höhere PGA lieferte. Somit erhielten wir insge-

samt 4 Berechnungsfälle – jede Aufnahme, d.h. Pernik und Krupnik, skaliert jeweils auf zwei PGA-Werte.

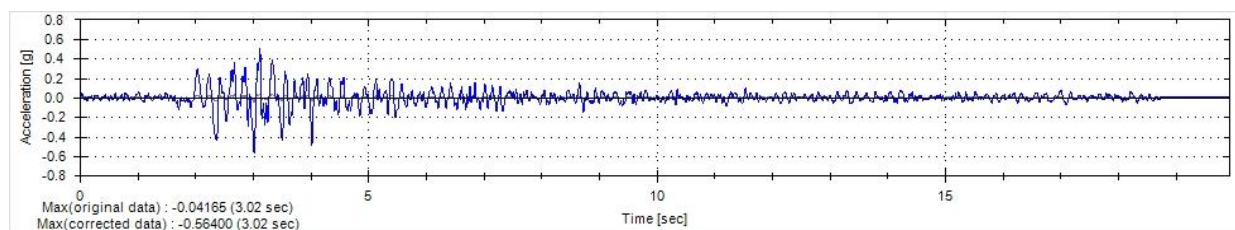


Abb. 8 Beschleunigungszeitablauf Pernik, skaliert auf Höchstwert 0,564 g

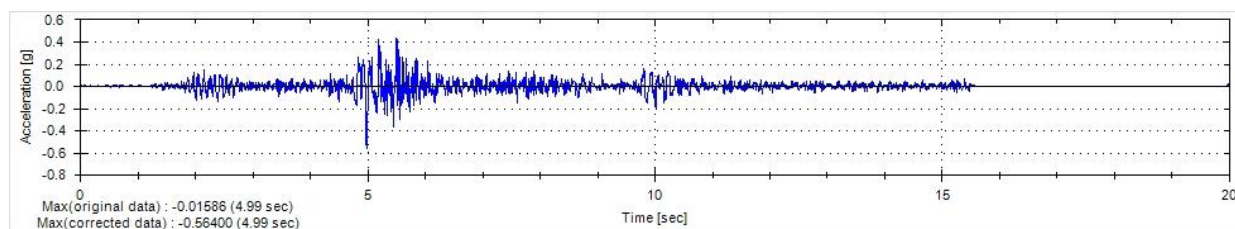


Abb. 9 Beschleunigungszeitablauf Krupnik, skaliert auf Höchstwert 0,564 g

2.3 Berechnungen und Ergebnisse

Die Berechnungen für die 4 formulierten Rechenfälle wurden erfolgreich durchgeführt, d.h. mit der notwendigen Konvergenz der Lösung in jedem Fall. Als Anfangsbedingung für die dynamische Untersuchung wurde jedes Mal der statische Spannungs- und Verformungszustand bei vollem Wasserspeicher angesetzt, d.h. eine statische Berechnung der Staumauer bei vollem Stausee wurde vorerst durchgeführt.

Die dynamische Wechselwirkung zwischen der Staumauer und dem Stausee bei der nachfolgenden eigentlichen dynamischen Untersuchung im Zeitbereich (auch s.g. Fluid-Struktur-Interaktion) wurde mit den s.g. Zusatzmassen berücksichtigt. Somit blieben wir nur bei der nichtlinearen Festkörperaufgabe für den Mauerkörper, ohne wirklichkeitsnäher die Wechselwirkung zwischen der schwingenden Staumauer und dem Stausee zu erfassen. Einerseits entspricht dieses Modell leider den Möglichkeiten des verwendeten Computerprogrammes. Andererseits aber ist es schon anhand zahlreicher Untersuchungen gut bekannt, daß gerade für Gewichtsstaumauern das Konzept der Zusatzmassen eine realistische (und durchaus zulässige in Bezug auf Sicherheit) Annäherung darstellt. Weiter sei hier erwähnt, daß der Wasserdruck in den offenen Rissen als konstant entsprechend dem maximal offenen Zustand berücksichtigt wurde.

Die Ergebnisse beinhalten sehr umfangreiche Information über das dynamische Mauerverhalten bei solchen starken Einwirkungen. Leider kann hier nur ein Bruchteil von diesen Ergebnissen vorgestellt werden. Das Erdbeben Krupnik mit PGA 0,305 g hat überhaupt keine Rissbildung verursacht, trotz der relativ hohen maximalen Bodenbeschleunigung. Deshalb haben wir diesen Fall auch nicht grafisch dargestellt. Die Grundperiode der Staumauer wurde zu 0,131 s berechnet. Das Erdbeben Krupnik mit PGA 0,564 g hat intensive Rissbildung verursacht, die sich in der Zeit zwischen 5,0 s und 5,5 s entwickelt hat. Das entspricht ziemlich gut zeitlich der Energiezufuhr in das Modellsystem, Abb 9. Dabei haben die ersten 6 der wasserseitigen Elemente an der Kontaktfuge versagt, wie auch nur das erste luftseitige Element am unteren Böschungsknick, Abb. 10. Das Erdbeben Pernik mit PGA 0,305 g führte nur zum

Versagen der ersten 3 wasserseitigen Elemente an der Kontaktfuge, Abb. 7. Diese Rissentwicklung entspricht auch genau der Zeit von 2,5 s bis 3,5 s, wenn der größte Teil der kinetischen Energie dem System zugeführt wird, Abb. 8. Das Erdbeben Pernik mit PGA 0,564 g hatte die schwersten Auswirkungen auf die Konstruktion der Staumauer, Abb. 11. Zwei Rißsysteme bildeten sich, wobei im Rahmen des ersten 12 wasserseitige Elemente an der Kontaktfuge versagten, und im Rahmen des zweiten – die ersten 3 luftseitigen Elemente am unteren Böschungsknick.

Das erstaunliche Ergebnis besteht aber darin, daß die unbefestigte Staumauer ihre Standfestigkeit trotz dieser äußerst starken Einwirkung und der erreichten Schadenstufe nicht verloren hat, was lange und tiefe Überlegungen zu den getroffenen Annahmen, benutzten Materialparametern, Modelleigenschaften, tatsächlichen Reserven des komplizierten mechanischen Systems und zukünftigen Forschungsaufgaben verursacht.

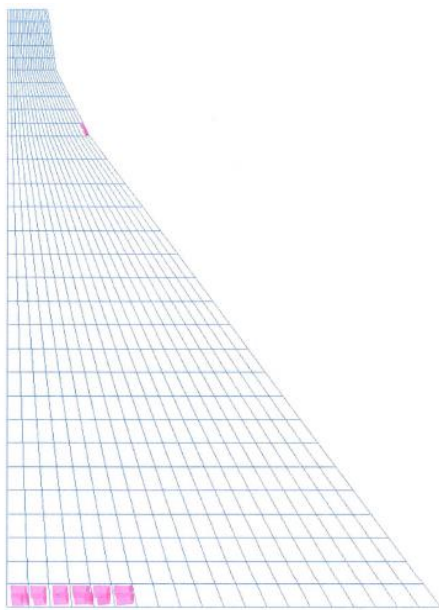


Abb. 10 Ermitteltes Rißprofil für das Erdbeben Krupnik, skaliert auf PGA 0,564 g

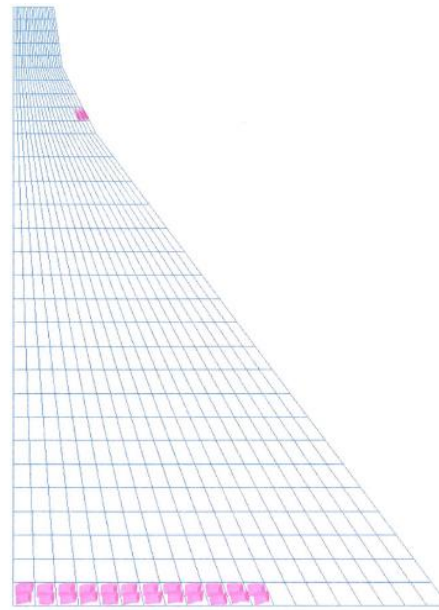


Abb. 11 Ermitteltes Rißprofil für das Erdbeben Pernik, skaliert auf PGA 0,564 g

Etwas näher können wir uns hier die nur beispielsweise für das Erdbeben Pernik mit PGA 0,564 g dargestellten Ergebnisparameter als Zeitfunktionen in Abb. 12 ansehen. Die erste Phase in der Rissbildung entwickelt sich schlagartig von 2,33 s bis 2,39 s, wenn die ersten 8 Elemente an der Kontaktfuge versagen. In dieser Zeit (ab 3,126 s) beginnt auch die Rissbildung am oberen Knick an der Luftseite. In der Zeit von 3,20 s bis 3,23 s versagen auch die restlichen 4 Elemente unten. Diese zwei Phasen sind an der zeitlichen Änderung der Bruchenergie in Abb. 12 recht gut zu erkennen. Im Rechenfall mit dem Erdbeben Krupnik mit PGA 0,305 g ohne Rissbildung beträgt der Wert dieser Energie zum Vergleich konstant Null.

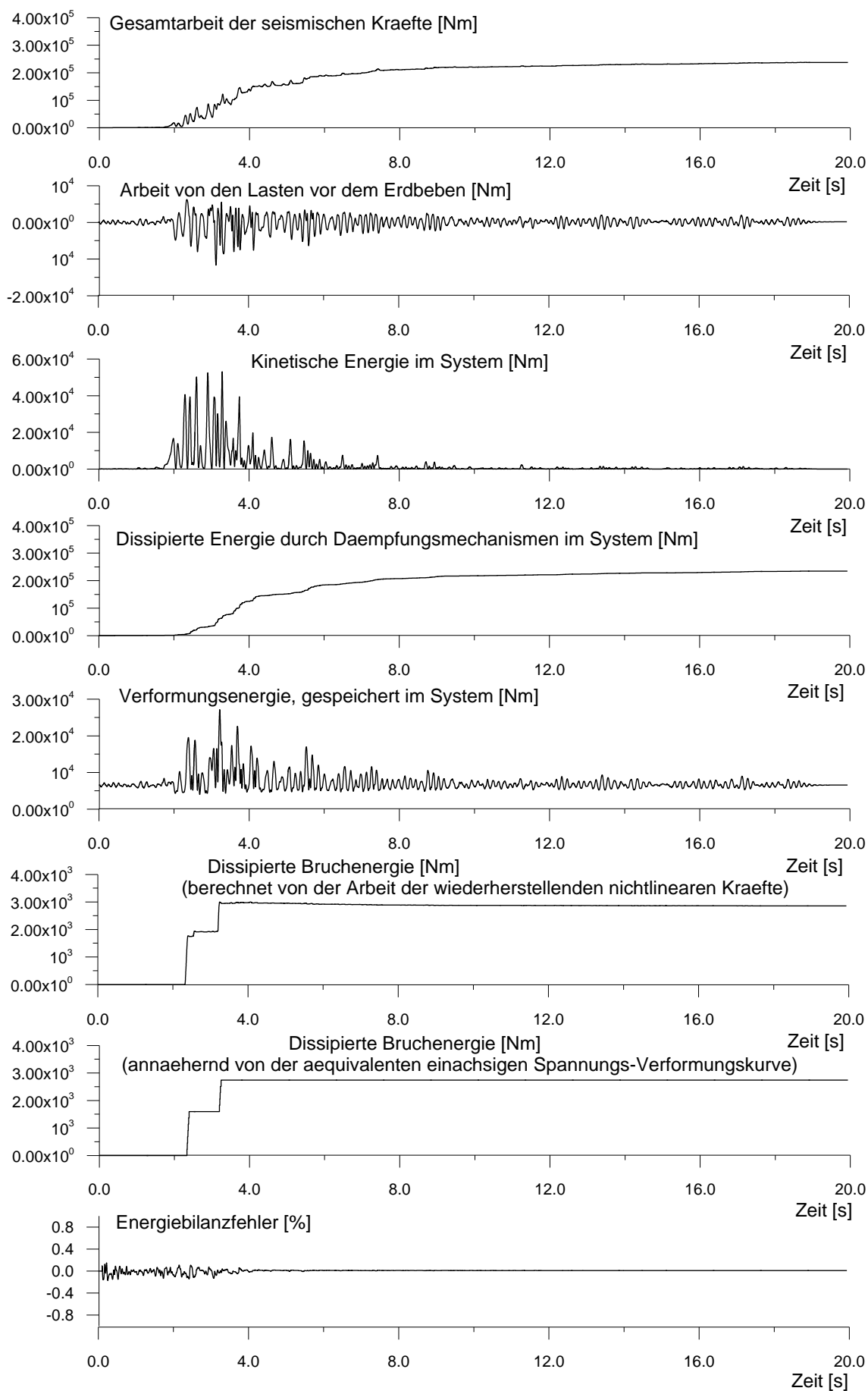


Abb. 12 Berechnungsfall: Einwirkung Pernik mit 0,564 g; wichtigste Ergebnisparameter von der durchgeführten Berechnung als Zeitfunktionen

3 Zum Befestigungsvorschlag und Schluss

Die im Rahmen der zitierten Planung, *Todorov (2015)* erarbeitete konstruktive Befestigung für das Mauerprofil, Abb. 4, Abb. 5, hat das konstruktive Problem gelöst. Auch bei seismischer Einwirkung mit PGA 0,564 g bleibt die Standsicherheit der Staumauer sichergestellt, und die maximalen Spannungen überschreiten die Zugfestigkeit des Betons nicht.

Somit ist eine offen gebliebene Frage auch schon beantwortet – die Staumauer würde auch im jetzigen Zustand ein relativ starkes Erdbeben mit großer Wahrscheinlichkeit ohne katastrophale Überschwemmung der Unterlieger überstehen. Es bleibt nur, daß die geplanten Sanierungsarbeiten so bald wie möglich durchgeführt werden, und die Staumauer entsprechend auf den heutigen Stand der Technik gebracht wird.

Dank

Die Autoren möchten sich hiermit speziell bei Prof. P.Leger from Ecole Polytechnique de Montreal für das freundlicherweise zur Verfügung gestellte Programm FRAC_DAM bedanken, ohne das diese Untersuchung in der vorgestellten Form gar nicht möglich gewesen wäre.

Literatur

Bhattacharjee S. (1996). FRAC_DAM. A finite element analysis computer program to predict FRACture and DAMage responses of solid concrete structures. Report No.EPM/GCS-1996-03. Dept. of Civil Engineering, École polytechnique Montréal

Prima Invest Konsult EOOD. (2013). Gutachten bezüglich Erhebungen, Untersuchungen, Planungen und Aktualisierung der physikalischen Parameter von Fels und Beton für Zustandsabschätzung und Erarbeitung eines Befestigungsvorschlages zur Sicherstellung der langfristigen Stabilität der Staumauer „Beli Iskar“ (in Bulgarisch), Sofia

Seong-Hoon Jeong, Kwang-Ho Lee, Won-Seok Jang. (2016). PRISM for Earthquake Engineering, A Program for seismic response analysis of SDOF systems, Version 2.0.0

Simeonov S. (Leiter der Forschungsgruppe und Direktor des Institutes) (2015). Bericht über die Bearbeitung und die Analyse der Erdbebenaufnahmen von 22.05.2012 (Seismizitätszone Pernik) und 27.07.2013 (Seismizitätszone Krupnik), registriert am Felsboden im Bereich des Rila Klosters (in Bulgarisch), NIGGG, Bulg. Akademie der Wissenschaften, Sofia

Todorov O. – Planungsleiter (2015). Konzeptuelle Planug für die Sanierung der Staumauer „Beli Iskar“ – Phase II (in Bulgarisch), Egis Bulgaria EAD

Anschrift der Verfasser

Univ.-Doz. Dr.-Ing. Dimitar Kisliakov
Lehrstuhl für Wasserbau, UABG
Boul.“Hr.Smirnenski“ 1, BG-1046 Sofia, BULGARIEN
kiss_fhe@uacg.bg

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Ognyan Todorov
Lehrstuhl für Wasserbau, UABG
Boul.“Hr.Smirnenski“ 1, BG-1046 Sofia, BULGARIEN
ogytod@gmail.com