

100 Jahre Edertalsperre – Untersuchungen zur Standsicherheit der Staumauer

Dr.-Ing. H. Fleischer (BAW), Dipl.-Ing. H.-J. Fröbisch (WSA Hann. Münden)

Tragwerke sind so zu bemessen und zu unterhalten, dass ihre Zuverlässigkeit über die gesamte Nutzungsdauer sichergestellt ist. Bei Staumauern wird im Allgemeinen von einer Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgegangen. Diese Zeitspanne wird nun bei der Edertalsperre überschritten, und es ergibt sich die Frage, mit welchen Maßnahmen und auf welcher Basis eine ausreichende Sicherheit auch in den kommenden Jahrzehnten erreicht werden kann. Es ist aber nicht nur das hohe Alter der Edertalsperre, das besondere Überlegungen zum Sicherheitszustand am Bauwerk erforderlich macht. Als Bauwerk der Talsperrenklasse 1 nach DIN 19700-11 ist hier aufgrund der Größe von Staumauer und Stauraum ein von vorn herein hohes Gefährdungspotential vorhanden, aus dem sich zusätzliche Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Tragwerks ergeben. Diese Anforderungen sind im maßgebenden Regelwerk der DIN 19700er Serie „Stauanlagen“ detailliert festgeschrieben und erstrecken sich nicht nur auf den Bau, sondern auch auf den Betrieb und die Unterhaltung von Stauanlagen. Die Normenserie wurde im Jahr 2004 letztmalig aktualisiert und per Erlass 2007 im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung eingeführt. In Anbetracht der beschriebenen Situation bestand die Notwendigkeit, die Eder-Staumauer vor dem Hintergrund bereits erfolgter Verstärkungsmaßnahmen und zukünftig zu erwartender Anforderungen in den Standards hinsichtlich der vorhandenen Sicherheit und der Erfüllung der Forderungen der allgemein anerkannten Regeln der Technik erneut zu überprüfen.

Untersuchungen zur Standsicherheit der Staumauer im heutigen Zustand

Die ca. 47 m hohe Gewichtsstaumauer der Edertalsperre wurde in Anlehnung an die Bauweise nach Prof. Intze aus fugenlosem Bruchsteinmauerwerk mit leicht bogenförmigem Grundriss errichtet. Letztmalig fanden umfangreiche statische Untersuchungen am Tragwerk der Ederstaumauer in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts statt. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde es notwendig, verschiedene Ertüchtigungsmaßnahmen – u.a. der Einbau hoch vorgespannter Vertikalanker mit entsprechender baulicher Anpassung im Kronenbereich (vgl. WSA Hann. Münden, 2014) - durchzuführen.

In der Zwischenzeit kam es zu den genannten Normenänderungen, die u.a. auch eine Anpassung der Bemessungswasserstände erforderlich werden ließ. Die entsprechende hydrologische Begutachtung erfolgte durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde und ergab teilweise etwas höhere Wasserstände. Neben den aktualisierten Wasserständen geht die neue Standsicherheitsuntersuchung auf alle zwischenzeitlich aufgetretenen, tragwerksrelevanten Veränderungen ein. Das Gesamtkonzept für die weitgehend abgeschlossenen Untersuchungen enthält drei wesentliche Komponenten: Neben der eigentlichen Untersuchung der rechnerischen Standsicherheit waren zwei-

tens die Datenbasis für die Materialkenngrößen des Bruchsteinmauerwerks und des Felsuntergrundes zu bewerten bzw. zu ergänzen und drittens die Messwerte der bisher in großem Umfang durchgeführten Überwachungs- bzw. Einzelmessungen zu prüfen und plausibilisieren.

Für die Bereitstellung von Festigkeitskennwerten des Bruchsteinmauerwerks und des Felsuntergrundes für die statischen Berechnungen konnte überwiegend auf die zurückliegenden und sehr umfangreichen Prüfungen im Zusammenhang mit der Tragwerksverstärkung vor über 20 Jahren zurückgegriffen werden. Da aufgrund des ungünstigen Verhältnisses zwischen Steingröße im Bruchsteinmauerwerk und Probendurchmesser der damals entnommenen Bohrkerns die im Labor ermittelten Festigkeiten mit größeren Unsicherheiten verbunden sind, wurde in einem quasi „numerischen Versuch“ ein fiktiver Mauerwerksreferenzkörper statisch modelliert, einer Standardbelastung ausgesetzt und anhand der bruchmechanischen Zusammenhänge aus den Stoffkennwerten von Mörtel und Steinen die Verbundfestigkeiten des Mauerwerks rechnerisch ermittelt (Maltidis et al, 2013). Mit dieser Methode werden die Unsicherheiten bei der Festigkeitsprüfung am Verbundkörper im Labor umgangen.

In Vorbereitung der statischen Berechnungen waren außer den Materialuntersuchungen auch die im Rahmen der Bauwerksüberwachung entstandenen Messdaten selektiv und ergänzend zu den bereits vorliegenden Auswertungen des Betreibers zu bewerten und auf Plausibilität zu prüfen. Im Vordergrund standen dabei die geodätischen Verformungsmessungen bzw. Lotmessungen sowie die Porenwasserdruckmessungen in Kombination mit der Temperaturerfassung, die in verschiedenen vertikalen Messquerschnitten durch den Mauerkörper vorgenommen wurden. Zunächst bestand die Notwendigkeit, für die nachfolgenden statischen Berechnungen Messwerte zur Kalibrierung der Berechnungsmodelle bereitzustellen. Ferner erlaubt die Auswertung vorhandener Messdaten und besonders deren Zeitverläufe eine grundlegende Bewertung des statischen Verhaltens des Tragsystems.

Die statischen Berechnungen selbst erfolgten auf der Basis der Finiten-Element-Methode (FEM) entsprechend den heute zur Verfügung stehenden Möglichkeiten. Die Staumauer wird dabei als inhomogenes Kontinuum dargestellt, so dass bei der Berechnung keine Einzeluntersuchungen der Gleitsicherheit, Kippsicherheit, Spannungsbegrenzung etc. nach der klassischen Balkentheorie erforderlich sind. Durch die komplexe Modellierung des Tragsystems Mauer-Fels bilden sich bei der rechnerischen Analyse die maßgebenden Dehnungs- bzw. Verzerrungszustände systemintern heraus und müssen entsprechend zu definierenden, sicherheitsbehafeten Versagenskriterien (plastischen Grenzdehnungen bzw. zulässigen Risszonen) gegenübergestellt werden. Um eine möglichst realitätsnahe statische Modellierung des Sperrkörpers zu ermöglichen, waren insbesondere folgende Effekte zu berücksichtigen:

- Wechselwirkung zwischen Rissbildung („klaffende Fuge“) infolge äußeren und inneren Wasserdrucks bzw. Temperatur einerseits und Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit des Mauerwerks bzw. Felsuntergrundes andererseits (hydraulisch-mechanische Kopplung),

- nichtlineares bzw. elastisch-plastisches Materialverhalten von Mauerwerk und Fels unter Beachtung der Inhomogenitäten,
- Einfluss der räumlichen Ausdehnung (3D) der Staumauer und der Felsklüftung.

Die entsprechende statische Modellierung ist deshalb komplex bzw. stark parameterabhängig und erfordert einerseits eine sorgfältige Kalibrierung der FEM-Modelle anhand vorhandener Messwerte (vgl. Folgebeitrag Schlegel/Fleischer), andererseits eine Ergebniskontrolle durch Vergleichsrechnungen mit voneinander unabhängigen Programmsystemen. Bei den durchgeführten Berechnungen kamen dementsprechend unterschiedliche FEM-Software und verschiedene statische Modelle zur Anwendung (Bild 1). Zusätzlich zu den Berechnungen in der Bundesanstalt für Wasserbau wurden FEM-Analysen durch das beauftragte Büro DYNARDO, Weimar erbracht.

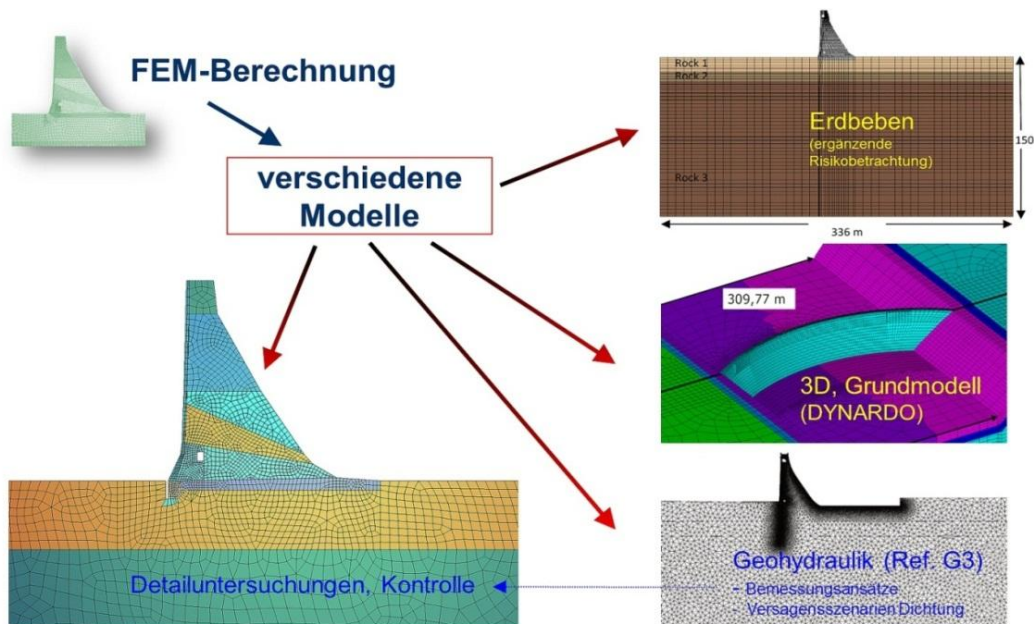


Bild 1: Statische Modelle der Eder-Staumauer zur Untersuchung von 3D-Effekten (1), Erdbebenwirkungen (2) und von Detailbereichen des Sperrenkörpers sowie zur Vergleichsrechnung (3)

Die Kalibrierung der statischen Modelle erfolgte durch die Anpassung der Modellparameter (E-Module, Permeabilität etc.) beim Abgleich berechneter und gemessener Verformungen und Porenwasserdrücke unter verschiedenen Randbedingungen, z. B. infolge jahreszeitlicher Temperaturänderungen (Bild 2).

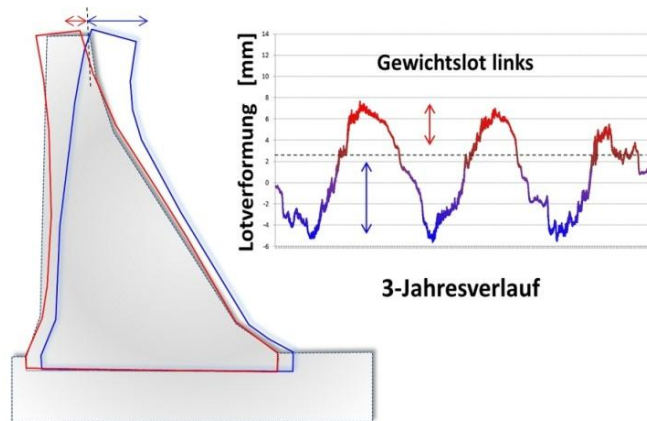


Bild 2: Modellkalibrierung: Vergleich gemessener Verformungen (hier Lotmessungen im Diagramm) infolge jahreszeitlicher Temperatureinwirkungen über 3 Jahre mit berechneten Werten unter Berücksichtigung stattfindender Wasserstandsänderungen

In die so angepassten statischen Modelle waren dann die entsprechenden Sicherheitselemente einzufügen und die sicherheitsbehafteten Bemessungslasten gemäß Norm anzusetzen. Dabei wurden diverse Einwirkungskombinationen unter Berücksichtigung verschiedener Temperaturzustände und teilweise bzw. vollständig ausfallender Sicherungselemente (Dichtungen, Injektionsanker) berücksichtigt. Ferner war der große Einfluss der Fels- und Mauerwerksfestigkeiten (anisotrope Zugfestigkeit, Reibung und Kohäsion) ausreichend zu beachten. Hierzu wurden verschiedene Variationsrechnungen mit wechselnden Fels- und Mauerwerksfestigkeiten durchgeführt. Letztendlich musste noch eine Analyse unter Gebrauchslasten, d.h. ohne Ansatz von Sicherheitsbeiwerten, vorgenommen werden, um Aussagen zum Verhalten unter Normalbetrieb und zur Überprüfung der optimalen Ausrichtung der messtechnischen Ausrüstung für die Überwachungsmessungen zu gewinnen.

Untersuchungsergebnisse

Die statischen Berechnungen haben ergeben, dass unter den vorgegebenen Randbedingungen das 100 Jahre alte Bauwerk eine ausreichende Standsicherheit aufweist und die Vorgaben des heute geltenden Regelwerks erfüllt werden. Darüber hinaus lässt sich auch die Notwendigkeit der früher durchgeführten Verstärkungsmaßnahmen (Injektionsanker) nochmals bestätigen. Besonders interessant ist das dreidimensionale Verhalten des fugenlos errichteten Bogentragwerks. Im Bild 3 ist als Beispiel die Verteilung der Horizontalspannung σ_x parallel zur Mauerachse (quer zum Tal) in 3 Lamellen dargestellt. Als Lasten wirkt hier neben dem Eigengewicht und dem Wasserdruck inklusive Porenwasserdruck auch eine im Vorfeld ermittelte Temperaturverteilung im Winter. Ohne Temperatureinwirkung und bei geringer Felssteifigkeit herrschen in Querrichtung infolge des radial wirkenden Wasserdrucks - geringfügig auch durch Bogentragwirkung u.a. - Druckspannungen vor. Dieser von Druckspannungen dominierte Grundzustand hat einen günstigen Einfluss auf die Trag- und Funktionsfähigkeit (Dichtheit etc.). Bei jahreszeitlicher Temperatureinwirkung entste-

hen zusätzliche Zwangsspannungen im Tragwerk: im Winter tritt an der abgekühlten Oberfläche Zug und als Reaktion im Mauerinneren Druck auf. Wie im Bild 3 erkennbar, überschreitet der temperaturbedingte Zugzwang das im Grundzustand herrschende Druckniveau, so dass an der Maueroberfläche quer zur Talrichtung Zugspannungen auftreten. Im dargestellten Beispiel entstehen an der luftseitigen Oberfläche winterliche Zugspannungen von etwa $0,2 \text{ N/mm}^2$, denen im Mauerinneren ein Druck um 1 N/mm^2 gegenübersteht. Zugspannungen in der genannten Größenordnung an der Maueroberfläche haben für die Standsicherheit der Staumauer unmittelbar keine Bedeutung. Für die Dauerhaftigkeit des Bruchsteinmauerwerks an der luftseitigen Oberfläche wirken diese sich wiederholenden Beanspruchungen jedoch ungünstig und können – zusätzlich zu anderen physikalisch und chemischen Effekten - zur Rissbildung im Mörtel mit schleichender Zerstörung führen.

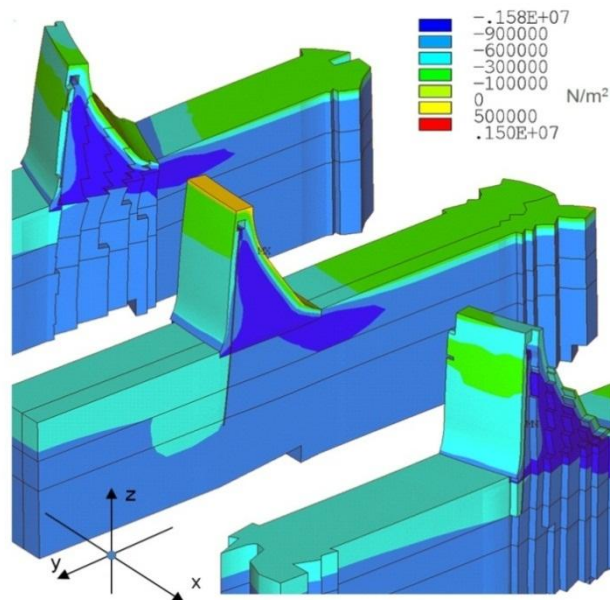


Bild 3: Horizontalspannung σ_x parallel zur Mauerachse in 3 Mauerlamellen in der Mitte und am Rand infolge Eigengewicht und Wasserdruck im Winter (Farbskala: gelb, rot entspricht Zugspannung)

Neben den eigentlichen Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen besteht im geltenden Regelwerk der DIN 19700-11 die Forderung, dass als Teil einer Risikobetrachtung zusätzlich Beanspruchungssituationen unter besonders extremen Annahmen zu untersuchen sind. Neben dem Tragwerksverhalten bei gesteigerter Erdbebeneinwirkung und bei Überschreitung der Bemessungswasserstände wurde diesbezüglich auch der Einfluss infolge Versagens der vorhandene Vertikalanker betrachtet. Im Bild 4 sind hierzu die entstehenden Risszonen im Mauerkörper nach Wegfall der Ankerkräfte und ergänzend bei ansteigender Wasserlast dargestellt. Die Größe der Risszone in der außergewöhnliche Bemessungssituation bei Komplettausfall der Anker liegt gemäß Norm noch im zulässigen Bereich. Um eine Vorstellung vom Versagensablauf und ggf. vorhandener zusätzlicher Reserven zu bekommen, wurde nach Ankerausfall zusätzlich eine Steige-

Die Tragfähigkeit des Mauerwerks unter der Wasserlast bis zum Bruch untersucht. Das Versagensbild zeichnet sich letztendlich durch eine Kombination aus Überschreitung der Schubfestigkeit des Mauerwerks und des Gleitwiderstands in der Gründungsfuge aus. Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass zusätzliche rechnerische Tragfähigkeitsreserven vorhanden sind.

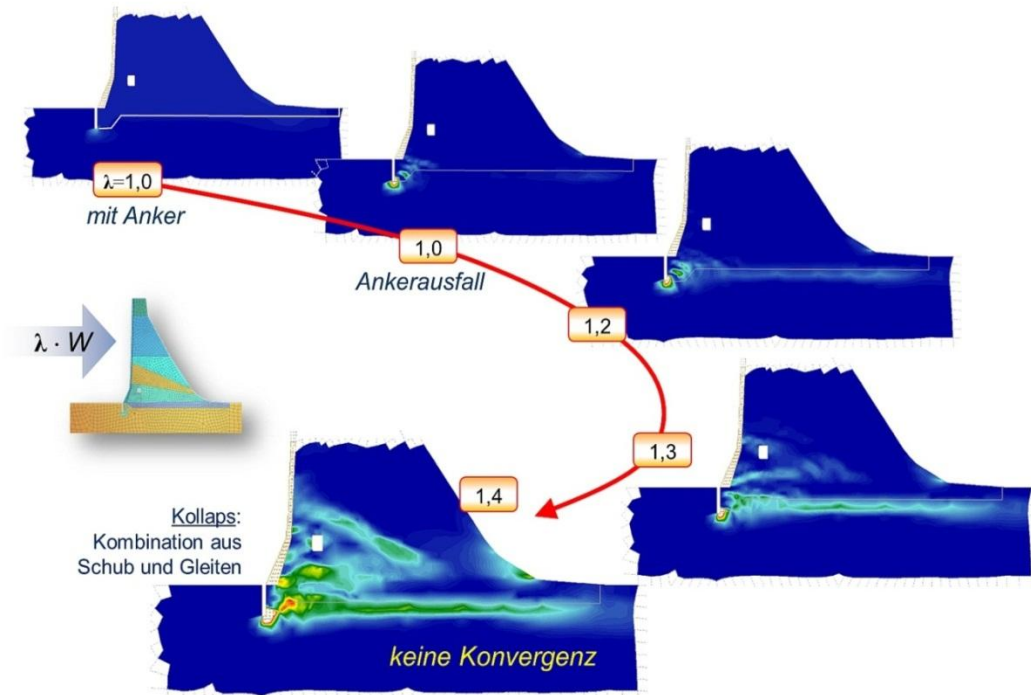


Bild 4: Risikobetrachtung: Rissbildung (Plastifizierung) nach Ausfall der Vertikalanker bei anwachsender Wasserlast und beginnendem Versagen des Staumauerquerschnitts

Bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse ist zu beachten, dass eine Tragwerksanalyse auf ingenieurmäßigen Ansätzen und Vereinfachungen beruht und stets nur den aktuellen Zustand erfassen kann. Unsicherheiten ergeben sich vor allem aus den idealisierten Ansätzen für die Stoffeigenschaften für Fels und Mauerwerk und der Annahme einer gleichmäßigen und homogenen Verteilung dieser Werte. Um diesbezüglich Klarheit zu schaffen, werden z. Z. neben Parameterüberprüfungen anhand stochastischer Nachrechnungen (vgl. Folgevortrag Schlegel/Fleischer) auch geodätische Messungen per automatisch arbeitendem Präzisionstachymeter vorgenommen (Bild 5). Ziel ist die Überprüfung des räumlichen Verformungsverhaltens des Mauerkörpers und ggf. auftretender Symmetrieabweichungen, aus denen Hinweise auf die stoffliche Homogenität des Tragwerks abgeleitet werden können. Die Untersuchungen erstrecken sich über einen längeren Zeitraum und sind noch nicht abgeschlossen.

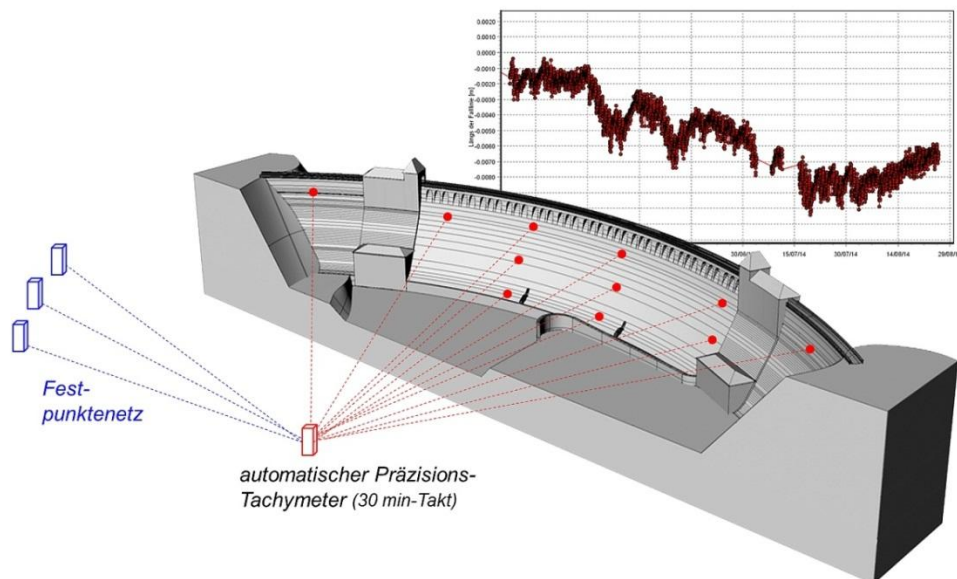


Bild 5: Ergänzende geodätische Präzisionsmessungen zur Überprüfung des Symmetrieverhaltens und der Verformungshomogenität am Tragwerk

Resümee

Aus der durchgeführten Tragwerksanalyse hat sich ergeben, dass auch nach 100-jähriger Standzeit an der Ederstaumauer eine ausreichende Standsicherheit vorhanden ist und das Tragwerk den allgemein anerkannten Regeln der Technik entspricht. Auch unter sehr unwahrscheinlichen Randbedingungen und Einwirkungen sind im Rahmen einer Risikobetrachtung genügend rechnerische Tragreserven nachweisbar. Dabei ist zu beachten, dass eine Tragwerksanalyse auf ingenieurmäßigen Ansätzen und Vereinfachungen beruht und stets nur den aktuellen Zustand erfassen kann. Trotz Berücksichtigung des rechnerischen Langzeitverhaltens und der Dauerhaftigkeit entsteht immer nur eine „Momentaufnahme“ des Bauwerkszustandes. Dementsprechend ist die langfristige Sicherstellung eines guten Erhaltungszustands der Gesamtanlage unter Einbeziehung einer sorgfältigen Bauwerksüberwachung mit modernen Methoden von grundlegender Bedeutung.

Literatur

Wasser- und Schifffahrtsamt Hann. Münden: Festschrift 100 Jahre Edertalsperre (2014)

G. Maltidis, L. Stempniewski, H. Fleischer: The influence of post-tensioned anchors to the seismic behaviour of an old masonry gravity dam, Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural , Wien, 28-30 August 2013