

## **Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit der Ederstaumauer mittels nichtlinearer stochastischer Finite-Element-Analyse**

Dr.-Ing. R. Schlegel (Dynardo GmbH, Weimar), Ing. Michal Mrozek (Dynardo GmbH, Weimar),  
Dr.-Ing. H. Fleischer (BAW)

### **Abstract**

Der Beitrag stellt vertiefende Untersuchungen zur vorhandenen Standsicherheit der Ederstaumauer mittels stochastischer Analyse vor. Die Grundlage der Untersuchungen bilden Berechnungen an einem dreidimensionalen, kalibrierten FE-Modell unter Anwendung nichtlinearer Stoffgesetze für Staumauer und Baugrund, der Berücksichtigung der Temperaturbeanspruchungen und der lastabhängigen Porenwasserdrücke im Mauerkörper.

### **1 Einführung**

Im Rahmen einer vertieften Überprüfung der Staumauer der Edertalsperre wurden detaillierte Standsicherheitsuntersuchungen nach dem neusten Stand der Normung durchgeführt. Basis dieser Untersuchungen sollte ein das Gesamttragwerk erfassendes, dreidimensionales Finite-Elemente-Berechnungsmodell sein, welches die Einwirkungen und Widerstände möglichst realitätsnah berücksichtigt. Die statischen Berechnungen wurden unter Anwendung nichtlinearer Stoffgesetze für Staumauer und geklüfteten Felsuntergrund, unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen instationären Temperaturfelder und der lastabhängigen Porenwasserdrücke im Mauerkörper durchgeführt. Dabei waren verschiedene Szenarien hinsichtlich der Wirksamkeit vorhandener Dichtungs- und Drainageelemente und der Beschaffenheit des anstehenden Felsuntergrundes zu berücksichtigen.

Die Standsicherheitsuntersuchungen umfassen folgende Fragestellungen:

- Kalibrierung und Verifikation des Berechnungsmodells gegenüber Messergebnissen,
- Standsicherheitsnachweis unter Verwendung des in /1/ vorgestellten Sicherheitskonzepts,
- grundsätzliche Untersuchungen zum Tragverhalten der Staumauer unter Berücksichtigung räumlicher Effekte,
- Bewertung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse und der Haupteinflussgrößen,
- Stochastische Untersuchungen zur Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit

Die Berechnungen wurden mit dem Finite-Element-Programmsystem *ANSYS*<sup>®</sup>, der elasto-plastischen Materialmodellbibliothek *multiPlas for ANSYS* und der Software für stochastische Analyse *optiSLang*<sup>®</sup> durchgeführt.

## 2 Nichtlineares Finite-Element-Modell

Für die kontinuumsmechanischen Berechnungen wurde ein 3D-Gesamtmodell der Ederstaumauer und des Untergrunds erstellt. Der Modellbereich erstreckt sich über eine Breite von 768 m, eine Länge von 515 m und eine Höhe von 218 m. Das FE-Modell ist in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt.

Der Untergrund wurde entsprechend der Angaben in /2/, /3/ und /5/ modelliert. Demnach sind drei Zonen unterschiedlicher Durchlässigkeit in vertikaler Richtung zu berücksichtigen (s. Abb. 2). Aus /2/ bzw. /5/ geht weiterhin hervor, dass der anstehende Untergrund im betrachteten Modellbereich wechselt. Am rechten Hang (bis ca. zur in Talmitte befindlichen Tonkluft) wurde bei den in /2/ dokumentierten Untersuchungen Tonschiefer mit Grauwackebändern, -bänken und -bänken vorgefunden. Am linken Hang (bis ca. zur Talmitte befindlichen Tonkluft) wurde Grauwacke, z.T. mit Tonschiefer-Zwischenlagen vorgefunden. Zur Simulation des nichtlinearen Verhaltens des Mauerwerks und des geklüfteten Felsuntergrunds wurden isotrope und anisotrope elasto-plastische Mohr-Coulomb Materialmodelle mit Zugspannungsbegrenzung verwendet. Dabei wurde im Untergrund auch die Lage und Ausrichtung der Trennflächenlagen berücksichtigt. Im Mauerwerk der Staumauer wurde zum Ausschluss vertikaler Zugspannungen eine „virtuelle“ horizontale Trennflächenlage simuliert.

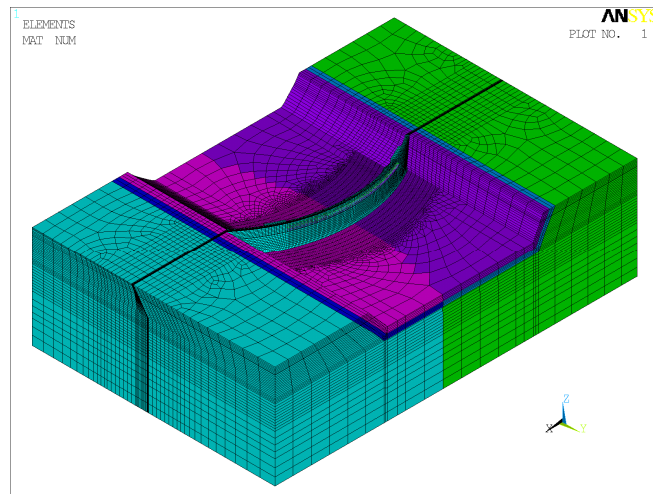
Der Dichtungsschleier reicht im Bereich der Tonkluft bis in eine Tiefe von +177,00 m und im restlichen Bereich beidseitig der Tonkluft bis in eine Tiefe von +191,00 m.

Insgesamt 104 Anker stabilisieren die Talsperre im mittleren Bereich. Jeder Anker enthält 34 Litzen. Die Querschnittsfläche jeder Litze beträgt 150 mm<sup>2</sup>. Die Ankerkraft beträgt 4500 kN/Anker. 52 Anker reichen in eine Tiefe von +167,0 m und 52 Anker reichen bis in eine Tiefe von +172,0 m. Der Krafteinleitungsbereich (Verbundlänge) der Anker im Fels beträgt jeweils 10 m.

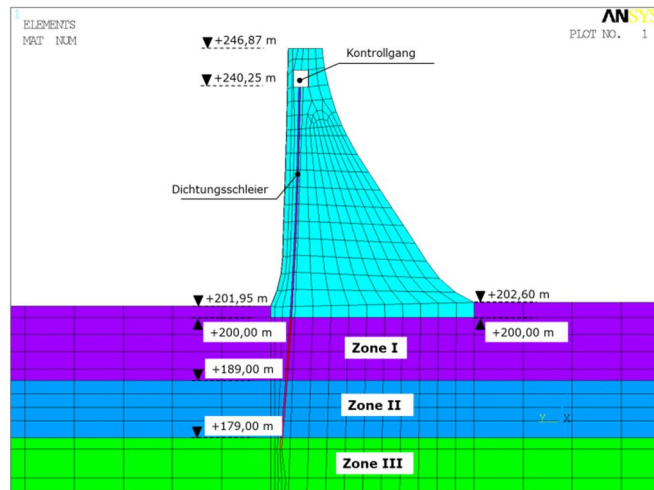
Es wurden in allen Lastfallkombinationen nichtlineare statische Berechnungen durchgeführt. Die mechanischen Randbedingungen wurden als Rollenlagerung im Fernfeld definiert. Damit wurden die vertikalen Verformungen am unteren Modellrand und jeweils die Verformungen senkrecht zu den seitlichen Modellrändern behindert. Die Lastgeschichte wurde in allen Lastfallkombinationen entsprechend der Zusammenstellung in Tab. 1 berücksichtigt. Dabei wurden die einzelnen Lasten mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten /1/ multipliziert.

Zur Ermittlung der Temperaturbeanspruchungen der Staumauer (normales Temperaturereignis mit bzw. ohne Einstau sowie extremes Temperaturereignis mit Einstau) wurden instationäre thermische Finite-Element Berechnungen durchgeführt. Als Grundlage für den Jahresgang der Außentemperaturen dienten die Daten aus /7/ im Bereich Hessen. Die Wassertemperaturen wurden in den thermischen Berechnungen in Abhängigkeit von Zeit und Wassertiefe nach bei der BAW verfügbaren Temperaturdaten berücksichtigt.

Die Berechnung der 3D-Porenwasserdruckfelder erfolgte mit ANSYS mittels instationärer thermischer Analyse bei Ausnutzung einer Temperatur-Strömungs-Analogie. Die hydraulische Analyse erfolgt auf Grundlage der Modellbildung für Sickerwasserströmungen im geklüfteten Felsgestein nach Wittke /8/. Die Berechnung erfolgte zur Ermittlung der freien Oberfläche in der Staumauer iterativ.



**Abb. 1:** 3D FE-Modell der Ederstaumauer



**Abb. 2:** 3D FE-Modell der Ederstaumauer - Ausschnitt

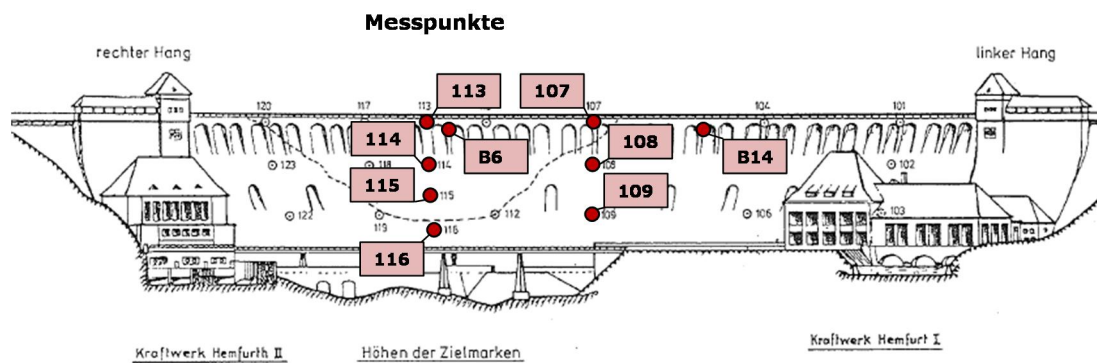
Lastschritte	Aktion
LS1	Aktivierung Eigengewicht Untergrund (Primärspannungszustand)
LS2	Aktivierung Eigengewicht der Mauer
LS3	Wasserdruck bis zur definierten Einstauhöhe
LS4	Wasserdruck bis zur Einstauhöhe beim Vorspannen der Anker (241,605 m NN)
LS5	Aktivierung Anker
LS6	Vorspannung Anker
LS7	Wasserdruck bis definierte Wasserstau
LS8 f.	Weitere (veränderliche) Lasten entspr. Sicherheitskonzept /1/

**Tab. 1:** Lastschritte LS der nichtlinearen Lastgeschichteberechnungen

### 3 Modellkalibrierung und Verifikation

Um die Realitätsnähe des Simulationsmodells zu steigern und damit eine hohe Qualität der Stand-sicherheitsuntersuchungen zu erreichen, wurde das Simulationsmodell durch Parameteridentifikation mit verfügbaren Messwerten der Ederstaumauer bestmöglichst abgeglichen. Für diese Kalibrierung standen Verformungsmessungen (Lotmessungen und Triangulationsmessungen) zur Verfügung. Die Triangulationswerte sind wegen der enthaltenen Temperatureinflüsse ungenauer. Sie wurden deshalb nur mit einer geringeren Wichtung (50%) in die Modellkalibrierung einbezogen. Die Lage der berücksichtigten Verformungsmesspunkte ist in Abb. 3 dargestellt. Weiterhin konnten Porenwasserdruck- und Temperaturmessungen zur Verifikation der hydraulischen und thermischen Analysen herangezogen werden.

Im ersten Schritt der Parameteridentifikation wurde mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht, welche Abhängigkeiten (bzw. Bestimmbarkeiten) zwischen den Modellparametern und den zu kalibrierenden Antwortgrößen existieren und welchen Streubereich das numerische Modell im Vergleich mit den Messwerten aufweist.



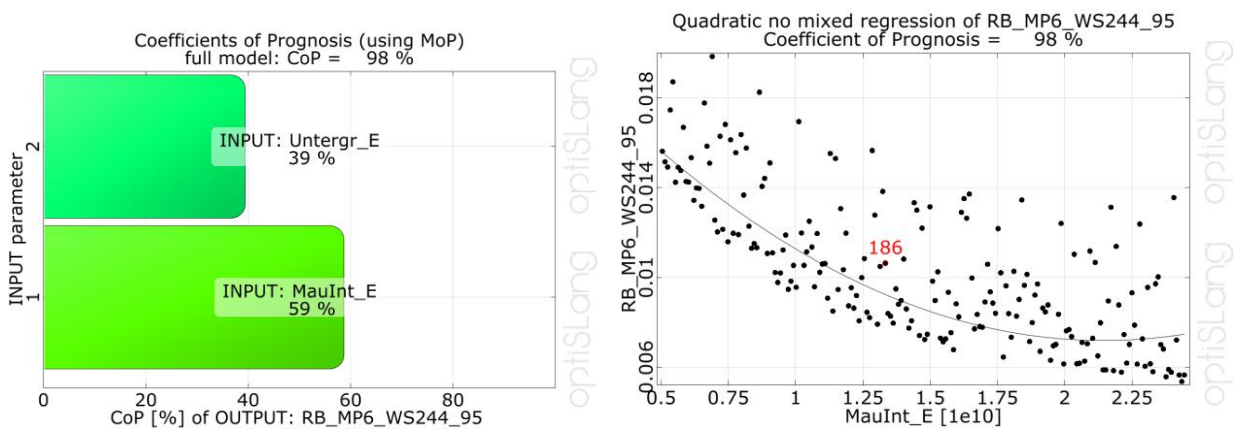
**Abb. 3:** Messpunkte der Verformungsmessungen (Bestand)

Die Sensitivitätsanalyse wurde mittels variationsbasierter Korrelationsanalyse in *optiSLang*<sup>®</sup> /9/ durchgeführt. Als streuende Inputparameter der Sensitivitätsanalyse wurden die Materialkenngrößen der Mauer und des Untergrunds zwischen minimalen und maximalen Grenzwerten variiert. Als Antwortgrößen wurden die radialen Relativverschiebungen an den in Abb. 3 angegebenen Messpunkten herangezogen. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden 200 Parameterkombinationen (Designs) berechnet. Für das Sampling der 200 Designs wurde das in *optiSLang*<sup>®</sup> verfügbare stochastische Latin Hypercube Sampling verwendet. In jedem Design wurde eine nichtlineare Lastgeschichteberechnung mit folgenden Lastschritten berechnet:

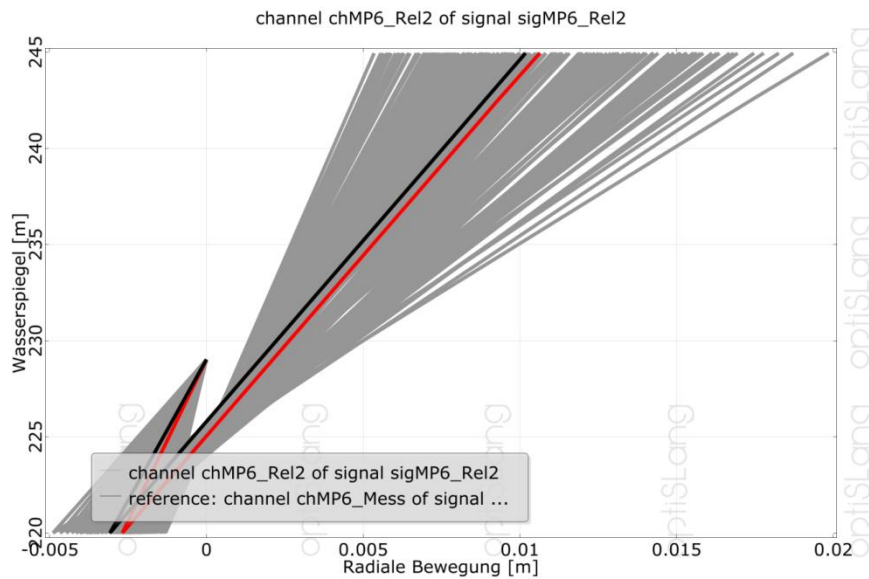
- LS1 Aktivierung Eigengewicht Untergrund (Primässpannungs Zustand)
- LS2 Aktivierung Eigengewicht der Mauer
- LS3 Wasserdruck bis zum Bezugswasserstand (229,02 mNN)
- LS4 Wasserdruck bei min. Wasserstand (220,00 mNN)
- LS5 Wasserdruck bei max. Wasserstand (244,95 mNN)

Da die Messwerte der Verformungsmessungen aus der Zeit vor der Sanierung und dem Einbau der vorgespannten Anker stammen, wurde die Staumauer in Sensitivitätsanalyse und Modellkalibrierung ohne Anker und Sanierungsmaßnahmen simuliert.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind exemplarisch für Messpunkt B6 (s. Abb. 3) in Abb. 4 dargestellt. Es wurden für jeden Messpunkt jeweils für den maximalen Wasserstand (244,95 mNN) und den minimalen Wasserstand (220,00 mNN) die für die Verformung relevanten Inputparameter (CoP-Werte als Balkenhistogramm) und die dazugehörigen Abhängigkeiten (Anthilplots der relevanten Inputparameter vs. Verformungsgröße) dargestellt. Die CoP-Werte sind Prognosemaße und zeigen an, zu wieviel Prozent die Streuung der betrachteten Antwortgröße (Verformung am Messpunkt) aus der Streuung (bzw. Variation) der jeweiligen Inputgröße erklärbar ist. Unwichtige Inputparameter (deren Streuungen nicht mit der Streuung der Antwortgröße korreliert sind) werden von *optiSLang*<sup>®</sup> automatisch herausgefiltert. Wie die Sensitivitätsanalyse aufzeigt, lassen sich durch die Verformungsmesswerte bei den betrachteten / gemessenen Wasserspiegeln insbesondere die Steifigkeiten des Untergrunds und des Mauerwerks der Ederstaumauer kalibrieren. Dabei können die Untergrundsteifigkeiten des linken und rechten Hangs zusammengefasst werden (Symmetrie der Abhängigkeiten und Verformungsmessungen vgl. z.B. MP4 / MP14, MP 109 / MP 115). Plausibel ist auch, dass die Steifigkeit des Mauerwerks für die höher gelegenen Messpunkte einen größeren Einfluss hat, während die Verformung am MP 116 nahezu ausschließlich durch die Untergrundsteifigkeit bestimmt wird. Abb. 5 zeigt die berechneten und gemessenen Verformungen. Schwarz markiert sind die gemessenen Werte, grau gefärbt ist das Streuband aller Designs und rot markiert ist das mittels Optimierung ermittelte best Design 186, welches eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Verformungswerten aufweist.



**Abb. 4:** Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für Messpunkt B6: links Histogramm der CoP, rechts: Anthillplot E-Modul der Staumauer (MauInt\_E) vs. Radiale Relativverformung der Staumauer am Messpunkt B6



**Abb. 5:** Radiale Relativverformung für MP B6, Grau: Streuband aller Designs; Rot: best Design Nr. 186; Schwarz: Messungen

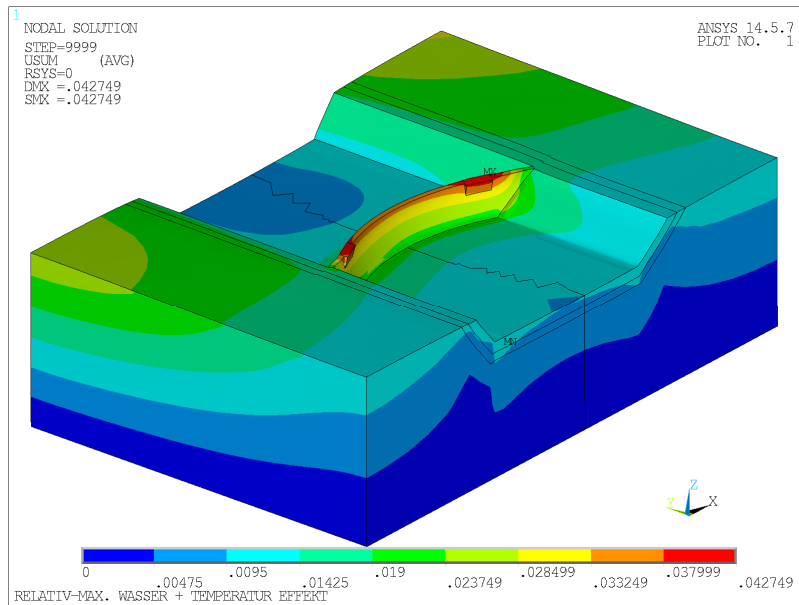
Im Ergebnis der Modellkalibrierung entstand ein Simulationsmodell, welches die verfügbaren Messungen hinsichtlich der Verformungen, Temperaturen und Porenwasserdrücke plausibel und mit guter Übereinstimmung nachvollziehen kann.

#### 4 Tragwerksanalyse

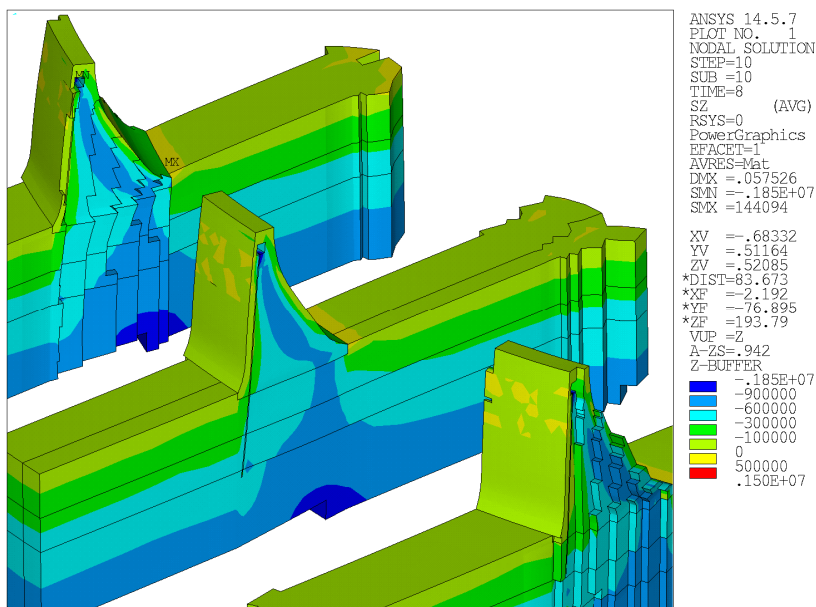
Auf Basis des in /1/ vorgestellten Sicherheitskonzepts wurde ein Standsicherheitsnachweis geführt. Dabei wurden insgesamt 8 Lastfälle mit Hilfe des kalibrierten nichtlinearen 3D-Simulationsmodells berechnet. Unter Verwendung der Schubspannungskriterien nach Mohr-Coulomb mit Zugspannungsbegrenzung wurde der Schubnachweis in allen Raumrichtungen geführt und es wurden die Zugspannungen in den Trennflächen, den (virtuellen) horizontalen Fugen der Staumauer und allen Raumrichtungen begrenzt. Zur Bewertung der Standsicherheit wurden die Relativverformungen (s. Abb. 6), die Last-Verschiebungshistorie, Haupt-, Horizontal-, und Vertikalspannungen (s. Abb. 7), plastische Dehnungen / Zonen klaffender Fugen und plastische Aktivitäten sowie das Erreichen einer konvergierten Gleichgewichtslösung herangezogen.

Klaffende horizontale Fugen wurden an Hand der aus den kontinuumsmechanischen Berechnungen plastischen Grenzdehnungen identifiziert. Eine Rissöffnung und damit eine klaffende (wasserführende) Fuge kann sich erst dann einstellen, wenn unter einer Zugbeanspruchung die Bruchenergie dissipiert und die Bruchdehnung des Bruchsteinmauerwerks erreicht bzw. überschritten wurde. Bei Zugrundelegung einer Rissbreite von  $w_{crit} \geq 0,15$  mm als wasserführende Rissbreite ergibt sich bei einer mittleren Steingröße von ca. 30 cm ein plastischer Grenzdehnungswert von 0,5 ‰. Das heißt, für Querschnittsbereiche in der Mauer, bei denen die plastischen Dehnungen den Wert von 0,5 ‰ überschreiten, wurde anstelle der im Ausgangsmodell angesetzten Permeabilität eine vollständig ungehinderte hydraulische Durchlässigkeit (Risswasserdruck) berücksichtigt.

Für alle untersuchten Lastfälle konnten Gleichgewichtslösungen gefunden und die Bewertungskriterien entsprechend des Sicherheitskonzepts /1/ eingehalten werden. Das bedeutet, dass unter Ansatz der getroffenen Annahmen und Idealisierungen die Standsicherheit unter den geforderten Vorgaben gegeben ist (vgl. Beitrag Fleischer/Fröbisch).



**Abb. 6:** Lastkombination SBS1 ( $Z_{H1}$ , Eislast, Wintertemperatur): Relativverschiebungen  $u_{SUM}$  (m) unter Gesamtlast



**Abb. 7:** Lastkombination SBS1 ( $Z_{H1}$ , Eislast, Wintertemperatur): Vertikalspannungen  $\sigma_z$  (Pa) unter Gesamtlast

## 5 Stochastische Analyse

Aufbauend auf den Standsicherheitsuntersuchungen wird derzeit unter Verwendung des kalibrierten FE-Modells eine stochastische Analyse zur Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit der Ederstaumauer durchgeführt.

Die Motivation für die stochastische Analyse resultiert aus mehreren Fragestellungen. So können mit einer stochastischen Analyse Widersprüche, die sich z.B. aus der Verwendung von Teilsicherheitsfaktoren in nichtlinearen Analysen ergeben, umgangen werden. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Frage nach dem Sicherheitsniveau eines vorhandenen Bauwerks. So ist es zwar grundsätzlich möglich, mit einem auf Sicherheitsfaktoren beruhenden Nachweiskonzept einen Standsicherheitsnachweis zu führen (s. Kap. 4). Soll auf dieser Basis jedoch ein vorhandener Sicherheitsabstand bis zum Versagen des Bauwerks prognostiziert werden, stellt sich gerade im Wasserbau die Frage, ob dieser durch eine lastseitige Erhöhung oder durch eine widerstandsseitige Reduktion bis zum Bauwerksversagen bestimmt werden soll. Beide Ansätze sind in Verbindung mit nichtlinearen Analysen nicht zweifelsfrei möglich.

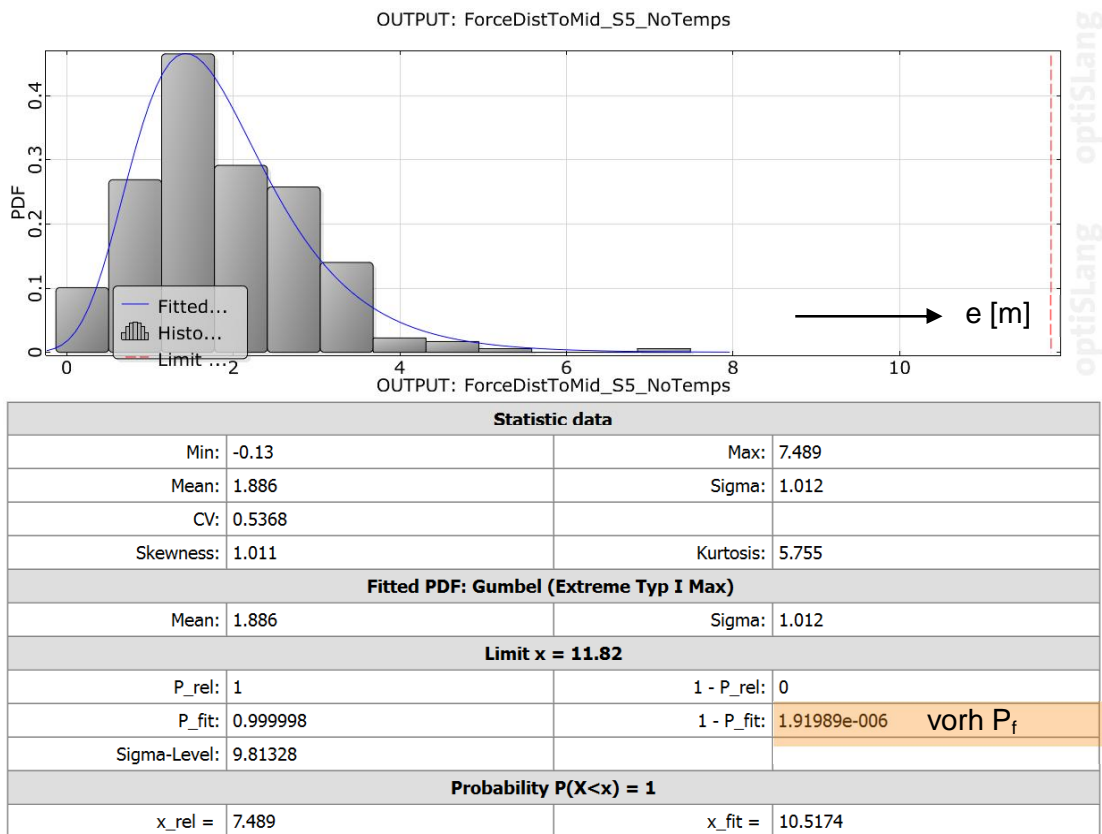
Mittels stochastischer Analyse können bei Einführung der last- und widerstandsseitigen Streuungen Versagenswahrscheinlichkeiten auch bei nichtlinearen Analysen bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist in EN 1990:2002 (Anhang B und C) enthalten. In einer aktuellen Zusammenarbeit der BAW und Dynardo soll am Beispiel der Ederstaumauer und durch weitere grundsätzliche Untersuchungen eine für praktische Projekte mögliche Vorgehensweise erarbeitet werden.

Die stochastische Analyse besteht aus folgenden Schritten.

- Definition der Streuungen der Inputparameter:  
Hierfür wurden in Abstimmung für alle relevanten Inputparameter des Berechnungsmodells (Materialkennwerte und Lasten) auf Basis des Mittelwerts, des charakteristischen Werts und bekannter Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse (wie z.B. BHQ10000) Verteilungsfunktionen angenommen.
- Generieren der Samples:  
Es wurden 300 Samples generiert. In *optiSLang*<sup>®</sup> stehen hierfür verschiedene Verfahren (Monte Carlo, Latin Hypercube, Directional Sampling, FORM, ...) zur Verfügung. Im Rahmen einer ersten Analyse wurde das Latin Hypercube Sampling verwendet.
- Definition der Bewertungskriterien:  
Als Antwortgrößen wurden Bewertungskriterien zur Standsicherheit (Kippsicherheit – Lage der Resultierenden, Gleitsicherheit – Haupt-Schubdehnung, Druckversagen – Hauptdruckdehnung und Rissicherheit in der Dichtungszone – max. plast. Vertikaldehnung) definiert, welche sich auch an dem in /1/ vorgestellten Nachweiskonzept orientieren.
- Durchführung der nichtlinearen Analysen:  
Es wurden 300 nichtlineare Analysen unter Verwendung eines bei Dynardo verfügbaren Rechenclusters mit bis zu 256 CPU innerhalb von 4 Tagen durchgeführt. Dabei wurde jeweils die in Kap. 4 ermittelte maßgebliche Lastfall (bzw. Lastgeschichte) verwendet.

- Auswertung und Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit:

Die Auswertung erfolgt in repräsentativen Schnitten der Staumauer. In *optiSLang*<sup>®</sup> stehen für die Auswertung einer stochastischen Analyse verschiedene Ergebnisgrößen und Ausgabemöglichkeiten zur Verfügung. In Abb. 8 ist exemplarisch für die Exzentrizität der Kraftresultierenden in einem ausgewählten Querschnitt die aus der stochastischen Analyse berechnete Verteilung (probability density function PDF) mit der entsprechenden Versagenswahrscheinlichkeit dargestellt. Die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  beträgt  $1,92 \text{ E-}06$  und liegt damit unterhalb des erforderlichen Werts von erf.  $P_f = 1 \text{ E-}05$ . Der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  beträgt  $4,6$  und ist größer als der erforderliche Wert von  $4,27$ . Neben der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit können in *optiSLang*<sup>®</sup> weiterhin die für die Verteilung der Antwortgröße maßgeblichen Einflussparameter qualitativ und quantitativ ausgegeben werden. Damit können Aussagen getroffen werden, welche streuenden Inputgrößen (Lasten, Widerstände) für das Versagen der Staumauer relevant sind.



**Abb. 8:** Berechnete Verteilung und Versagenswahrscheinlichkeit der Bewertungsgröße (hier Exzentrizität  $e$  der Kraftresultierenden in der Gründungsfuge unter Einwirkung von Eigengewicht und Wasserdruck)

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden statische Finite-Element-Berechnungen (3D) unter Anwendung nichtlinearer Stoffgesetze für Staumauer und Baugrund, Berücksichtigung der jahreszeitlichen instationären Temperaturfelder und der lastabhängigen Porenwasserdrücke im Mauerkörper durchgeführt. Das dabei verwendete FE-Berechnungsmodell wurde an verfügbaren Messergebnissen kalibriert. Die Nachweise zur Standsicherheit wurden mit Hilfe von Teilsicherheitsbeiwerten nach einem vom Kunden erarbeiteten Sicherheitskonzept erfolgreich geführt. In Ergänzung dazu werden derzeit mit Hilfe einer stochastischen Analyse Versagenswahrscheinlichkeiten der Ederstaumauer gegenüber verschiedenen Bewertungskriterien ermittelt. Es zeigte sich, dass die Definition der Bewertungskriterien die Größe der Versagenswahrscheinlichkeit beeinflusst. Durch weitere systematische Untersuchungen sollen in einer Zusammenarbeit der BAW und Dynardo grundlegende Aussagen zur Definition dieser Bewertungskriterien zum Nachweis von Staumauern mittels stochastischer Analyse erarbeitet werden.

## Referenzen

- / 1 / Fleischer, H; Fröbisch, H.-J.: 100 Jahre Edertalsperre – Untersuchungen zur Standsicherheit der Staumauer. BAW Kolloquium Berechnungen und Analysen für bestehende Wasserbauwerke, 23. - 24.09.2014, Karlsruhe
- / 2 / Ingenieurgeologisches Gutachten, Hessisches Landesamt für Bodenforschung (345-310/85 Hz/Str., 1985
- / 3 / Geologisches Ergänzungs-Gutachten, Hessisches Landesamt für Bodenforschung (345 - 36/92 Hz/Bm, 1992
- / 4 / EDERTALSPERRE 1994, Festschrift, Herausgegeben aus Anlaß der Wiederherstellung der Staumauer, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte Hannover, 1994
- / 5 / Holtz, S.: Die geologischen Verhältnisse, in /4/, Beitrag 3, S.24-25
- / 6 / Wittke, W.: Standsicherheitsberechnungen der Ederstaumauer nach der FE-Methode, in /4/, Beitrag 5, S.29-35
- / 7 / TRY\_2011 – Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) / Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH / Deutscher Wetterdienst, 2011
- / 8 / Wittke, Walter: Felsmechanik, Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1984)
- / 9 / optiSLang - the optimizing Structural Language version 3.2.1, DYNARDO GmbH, Weimar, 2012, [www.dynardo.de](http://www.dynardo.de)