

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Aldermann, Kristina; Beetz, Uwe; Bellak, Christian**

## **3-D-FE-Modellierung für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107085>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Aldermann, Kristina; Beetz, Uwe; Bellak, Christian (2020): 3-D-FE-Modellierung für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Interdisziplinärer Wasserbau im digitalen Wandel. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 63. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 413-422.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# 3-D-FE-Modellierung für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern

Kristina Aldermann  
Uwe Beetz  
Christian Bellak

Beim Zuverlässigkeitsnachweis für Absperrbauwerke von Stauanlagen ist gemäß DIN 19700-11 (2004) nachzuweisen, dass sie als Ganzes tragsicher sind. Dabei ist das Zusammenwirken von Bauwerk und Untergrund zu berücksichtigen. Eine 3-D-, mindestens aber eine 2,5-D-Modellierung ist dabei unumgänglich. Am Beispiel der kombinierten Bogen-Gewichts-Staumauer der Okertalsperre im Harz werden die Herausforderungen innerhalb der FE-Modellierung veranschaulicht. Es wird die Umsetzung der notwendigen Idealisierung verdeutlicht sowie die Schwierigkeit der Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten innerhalb der FEM-Berechnungen dargestellt.

Stichworte: Zuverlässigkeitsnachweis, Bogenstaumauer, 3-D-FEM-Berechnung, DIN 19700-11, DWA-M 542, Teilsicherheitsbeiwerte

## 1 Allgemeine Informationen zur Okertalsperre

Die Okertalsperre wurde zwischen 1952 und 1956 gebaut. Die Okertalsperre ist eine 75 m hohe, 8 m breite und 260 m lange, kombinierte Bogen- und Gewichtsstaumauer aus Beton (Abbildung 1). Die Bogenmauer hat eine Höhe von 61 m, einen Öffnungswinkel von ca. 110° und besteht aus zehn einzelnen Blöcken mit fünf seitlich angeordneten, verbreiterten Blöcken, welche die Kräfte des Bogens in das Gebirge übertragen. Aufgesetzt ist eine Gewichtsmauer mit einer Höhe von 14 m mit Flügeln, aus acht weiteren Blöcken bestehend, welche die Talbereiche abriegeln, die durch die Bogenmauer nicht abgeschlossen werden. Aufgrund der Höhe des Absperrbauwerkes von 75 m über der Gründungssohle (> 15 m) und der Größe des Stauraumes von 48,27 Mio. m<sup>3</sup> (> 1,0 Mio. m<sup>3</sup>) gehört die Okertalsperre nach DIN 19700-11 (2004) zur Talsperrenklasse 1. Sie wird von der Harzwasserwerke GmbH betrieben. Tractebel Hydroprojekt GmbH führte die

Vertiefte Überprüfung der Okertalsperre von 2017 bis 2019 durch. Dazu gehörte auch die Aktualisierung der Zuverlässigkeitsnachweise, welche im September 2019 abgeschlossen wurde.

## 2 Maßgebende Normen und Regelwerke

Nach *DIN 19700-11 (2004)* soll die Nachweisführung bei Standsicherheitsberechnungen von Talsperren nach dem Gesamtsicherheitskonzept (GSK) erfolgen. Zusätzlich wird aber darauf hingewiesen, dass die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes (TSK) möglich ist, wenn das gleiche Sicherheitsniveau gewährleistet wird. Zur Umsetzung dieser Forderung wurde das DWA-Merkblatt 542 (2017) erarbeitet. Nach *DIN 19700-11 (2004)* ist die Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund in den Nachweis der Sicherheit einzubeziehen. Die Erfassung dieser Wechselwirkung fordert die Anwendung eines kontinuumsmechanischen Berechnungsverfahrens, z.B. die „Finite Elemente Methode“ (FEM). Mit diesem Verfahren sind neben statischen Spannungs-Verformungsberechnungen auch die erforderlichen dynamischen Berechnungen der Erdbebeneinwirkung sowie Potentialberechnungen der Durchströmung und Temperatureinwirkung möglich. Die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes birgt zusätzlichen Aufwand bei Berechnungen mit der FEM für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern.



**Abbildung 1:** Luftseitige Ansicht der einfach gekrümmten Bogenmauer der Okertalsperre

### 3 Herausforderungen bei der Anwendung von FE-Modellen

Die Grundlage für Standsicherheitsberechnungen von Staumauern ist ein Modell. Das Modell umfasst mehrere Teile:

1. Geometrie von Bauwerk und Gelände
2. Randbedingungen am geometrischen Modell
3. Beschreibung der Materialien durch geeignete Stoffmodelle sowie Bestimmung zugehöriger Materialkennwerte
4. Beschreibung der Einwirkungen
5. Steuerung der Berechnung
6. Auswertung und Visualisierung der Berechnungsergebnisse

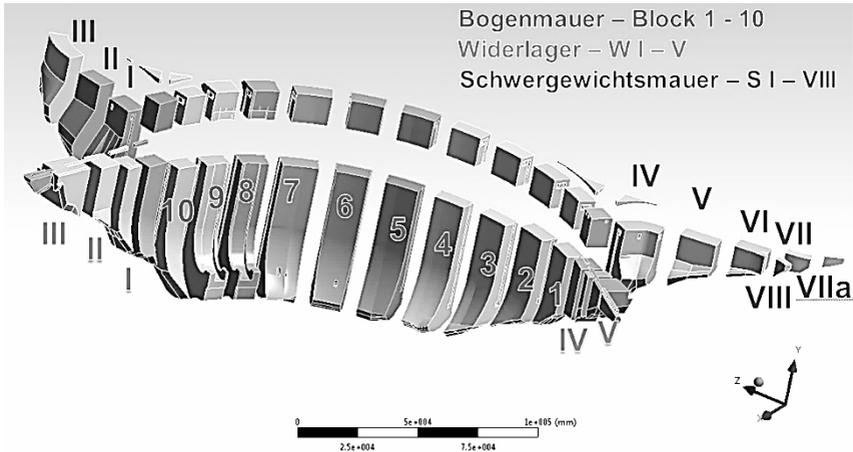
In allen Modellebenen sind Idealisierungen erforderlich. Damit wird die Realität zum Modell.

#### 3.1 Erstellung des geometrischen Modells

Der Umfang der notwendigen Idealisierung wird maßgeblich durch das zu untersuchende Bauwerk bestimmt. Hierzu gehört ebenso die Entscheidung ob ein 2-D-, 2,5-D- oder 3-D-Modell nötig ist. Um der Forderung nachzukommen, die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Untergrund realistisch abzubilden, muss bei Zuverlässigkeitsnachweisen von Staumauern auf Fels mindestens ein 2,5-D-Modell erstellt werden. Nur so können die Eigenschaften des Gebirges, wie Trennflächen und ein mögliches Versagen oder Abgleiten auf diesen im Untergrund, abgebildet werden. Im Modell der Okertalsperre gibt es keine kinematisch relevanten Trennflächen. Hier besteht die Schwierigkeit die komplexe Geometrie des Bauwerkes im Modell abzubilden (Abbildung 2). Da es sich bei der Okertalsperre um eine Bogenstaumauer handelt und sich bei einer gekrümmten Mauerachse eine räumliche Tragwirkung einstellt, ist hier eine 3-D-Berechnung der gesamten Staumauer und des Untergrundes unerlässlich.

#### 3.2 Randbedingungen am geometrischen Modell

Die Dimension des Modells bestimmt die notwendigen Randbedingungen. Diese sind erforderlich in Richtung aller drei Koordinatenachsen. Bei dem 3-D-FE-Modell der Okertalsperre wurde der untere Modellrand unverschieblich in Richtung aller drei Koordinatenachsen festgelegt, wohingegen die seitlichen Modellränder unverschieblich in Richtung der Flächennormalen definiert wurden.



**Abbildung 2:** Ansicht der Einzelkomponenten des modellierten Absperrbauwerkes der Okertalsperre

### 3.3 Auswahl von Stoffmodellen und Bestimmung der Materialkennwerte

Das Verhalten des Absperrbauwerkes der Okertalsperre und des Untergrundes wird mit der FEM in Verbindung mit genügend zutreffenden Stoffgesetzen entsprechend den gegenwärtig a. a. R. d. T. hinreichend genau berechnet. Fels besteht aus Gestein, dessen Zusammenhalt durch Trennflächen örtlich reduziert bzw. aufgehoben wird. Die Abbildung des Gefüges im Modell ist die Voraussetzung für eine felsmechanische Untersuchung. Damit ist eine realitätsnahe Beschreibung des Spannungsdehnungsverhaltens des Felses möglich. Die Trennflächenscharen im Untergrund können diskret, als räumlich orientierte Materialeigenschaft oder durch Angabe von Kennwerten für den Fels mit den darin enthaltenen Trennflächen modelliert werden. Bei der Okertalsperre ist die Wirkung der Trennflächen bereits in den Materialdaten für den Fels enthalten. Die Trennflächen stellen die maßgebenden Wasserwege im Gebirge dar. Die Modellierung erfolgt durch Ansatz von insitu bestimmten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerten für das Gebirge. Gerade im Talsperrenbau ist die Sickerströmung im Fels von besonderer Bedeutung, weil diese die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit beeinflusst. Außerdem sind Abdichtungs- und Drainagemaßnahmen des Felsuntergrundes durch Angabe entsprechender Durchlässigkeitsbeiwerte oder Randbedingungen anzugeben.

Die Materialeigenschaften, beschrieben durch Kennwerte für wahrscheinliche und ungünstige Bedingungen für die gewählten Stoffgesetze und die Wirksamkeit baulicher Einrichtungen, werden in den zugehörigen Bemessungssituationen betrachtet.

### 3.4 Beschreibung der Einwirkungen und Steuerung der Berechnung

Abhängig von der jeweiligen Bemessungssituation nach *DWA-M 542 (2017)* werden verschiedene Einwirkungskombinationen erstellt, welche am geometrischen Modell beschrieben werden müssen. Jede voneinander unabhängige Einwirkung wird innerhalb der Berechnung in einem separaten Lastschritt definiert. Die zeitliche Reihenfolge muss dabei sinnvoll festgelegt werden. Dies ist ein maßgeblicher Bestandteil, um die Berechnung richtig zu steuern. Gleichermäßen gehört dazu die Steuerung der nichtlinearen Berechnung durch die Wahl eines geeigneten Iterationsverfahrens. Die Steuerung der Iteration beeinflusst die Qualität der Ergebnisse, die Rechenzeit und den Speicherplatzbedarf maßgeblich.

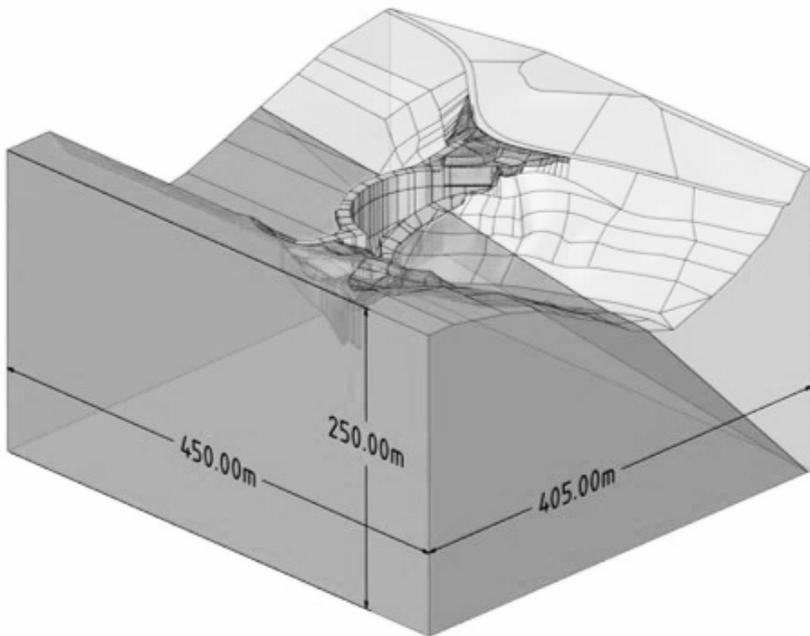


Abbildung 3: Isometrische Ansicht mit Modellabmessungen der Okertalsperre

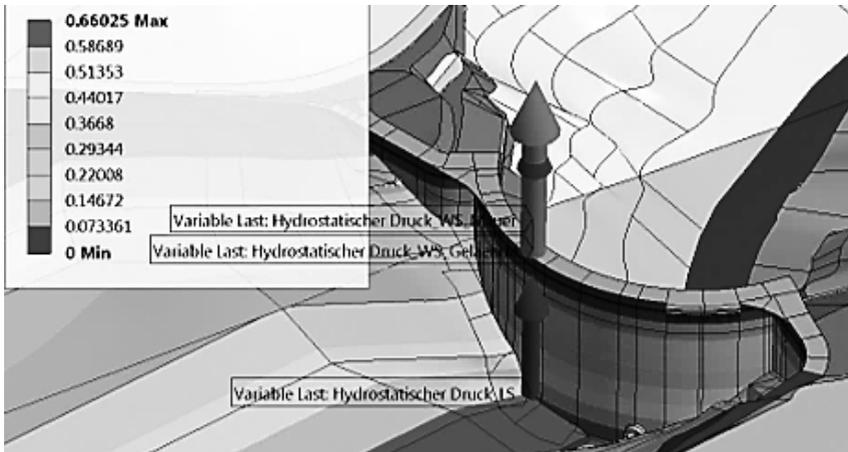


Abbildung 4: Beschreibung der Einwirkungen – hydrostatischer Wasserdruck

### 3.5 Auswertung und Visualisierung der Berechnungsergebnisse

Um eine gezielte Ergebnisauswertung vornehmen zu können, muss meistens schon in der Modellierungsphase entsprechend darauf Einfluss genommen werden. Primär ist eine feinere Vernetzung in Bereichen mit großen Gradienten der Zustands- und Wirkungsgrößen nötig. Je näher man an den Modellrand kommt, umso gröber kann die Vernetzung werden, da hier die Einflüsse des Bauwerkes weitestgehend abgeklungen sein sollten. Hierbei ist es wichtig, die Modellabmessungen im Untergrund so zu wählen, dass maßgebende Einflüsse auf das Kontinuum weitgehend abgeklungen sind (Abbildung 3). Bereiche im Untergrund, welche schon als Problembe- reiche diagnostiziert wurden, sei es in der Bauwerksüberwachung (bei bestehenden Bauwerken) als auch durch Baugrundgutachten, sollten in ihrem Grad der Detailgenauigkeit entsprechend berücksichtigt werden. Außerdem sind unabhängig von den genannten Gesichtspunkten auch Orte im Modell feiner zu vernetzen, wo die maßgebenden Nachweise für den Zuverlässigkeitsnachweis erwartungsgemäß zu führen sind.

### 3.6 Zusammenspiel von Datengrundlage und Idealisierungsgrad

Bei bestehenden Bauwerken ist es oftmals schwierig, die erforderliche Datengrundlage zu beschaffen, da für die Umsetzung sowohl Angaben über die derzeitigen sowie über die vor dem Bau der Staumauer vorhandenen Gelände- verhältnisse notwendig sind. Aufgrund des nichtlinearen Material- verhaltens von Fels muss auch die Belastungsgeschichte im Modell berück-

sichtigt werden. Dazu ist es notwendig folgende Bauphasen innerhalb der Berechnung in einzelnen Lastschritten abzubilden:

1. Gelände vor Aushub der Baugrube mit primärem Spannungszustand,
2. Gelände mit Baugrubenaushub und
3. Bau der Staumauer mit Geländeanpassung (Straße, Parkplatz, Auffüllung etc.).

Anschließend kann die Berechnung weiterer Lastschritte, wie Einstau mit Durchströmung, Temperatur, Eis etc. erfolgen. Eine hohe Detailgenauigkeit ist nur dann sinnvoll, wenn die Grundlage auf vorhandenen Informationen und nicht auf Annahmen beruht. Folgende Details wurden bei der Modellierung des 3-D-FE-Modells der Okertalsperre umgesetzt: Detailgenauigkeit in der Gründungssohle, Berücksichtigung der vorhandenen Hohlräume, Ausbildung der vorhandenen Fugen, Fahrbahnausbildung sowie der Übergang der Widerlager in das anschließende Gelände. Details wie z.B. die Brüstungen entlang der Mauerkrone wurden im Modell der Okertalsperre nicht abgebildet, weil sie hinsichtlich der Beurteilung der Gesamtstandisicherheit zu vernachlässigen sind (Abbildung 4).

## 4 Angaben zum FE-Modell der Okertalsperre

Das 3-D-FE-Modell der Okertalsperre besteht aus 172 Einzelkörpern, 580 214 Elementen und 877 327 Knoten. Die Lage der Modellränder wurde so gewählt, dass die Einflüsse des Bauwerkes im Untergrund weitestgehend abgeklungen sind. Die Modellabmessungen des FE-Modells der Okertalsperre betragen von der Wasser- zur Luftseite 450,00 m, von dem rechten zum linken Hang 405,00 m und in der Höhe 250,00 m. Zwischen allen sich berührenden Körpern wurden Kontakte definiert, welche die Berührungsflächen miteinander koppeln. Diese Vorgehensweise lässt es zu, jeden Einzelkörper unabhängig von den anderen Körpern zu vernetzen. Aufgrund der sehr komplexen Bauwerksgeometrie sowie einer hohen Detailgenauigkeit in der Gründungssohle war diese Vorgehensweise im konkreten Fall unumgänglich. In Hinblick auf die Rechenzeit wirken sich Kontakte negativ aus. Im Zuge der Modellerstellung sollte deshalb die Notwendigkeit einer hohen Detailgenauigkeit sorgfältig abgewogen werden.

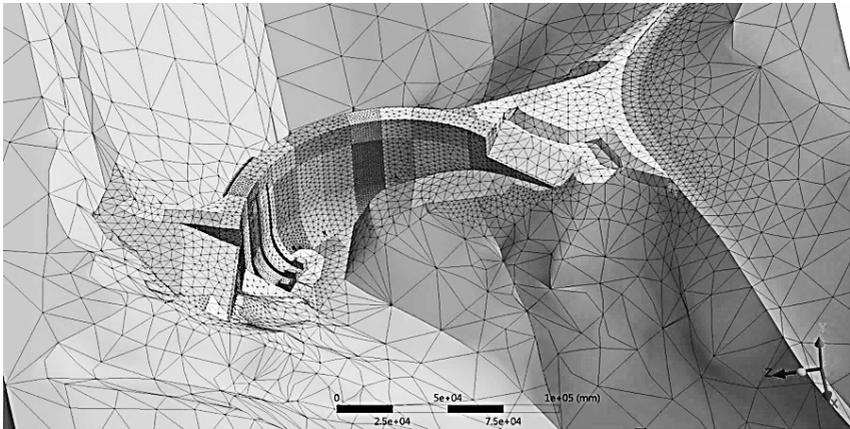


Abbildung 5: 3-D-FE-Modell der Okertalsperre – Ausschnitt der Mauer

## 5 Ansatz des Teilsicherheitskonzeptes

Die Anwendung des TSK birgt zusätzliche Aufwendungen bei FEM-Berechnungen für Zuverlässigkeitsnachweise von Stau Mauern. Da die Teilsicherheitsbeiwerte zum Teil bereits innerhalb der Berechnung angesetzt werden, mindestens bei den Materialeigenschaften und den Einwirkungen, hat dies zur Folge, dass es nicht ausreicht, nur eine Berechnung für jede zu untersuchende Bemessungssituation vorzunehmen. Bei Ansatz des GSK war es hinreichend, jeden Lastfall genau einmal zu berechnen, da die Auswertung der Sicherheit erst innerhalb der Nachweisführung erfolgt, dann mit Ansatz unterschiedlicher Sicherheitsanforderungen je nach Lastfall und Nachweis. Mit Ansatz des TSK ergibt sich die Problematik, dass die unterschiedlichen Nachweise innerhalb einer Bemessungssituation verschiedene Teilsicherheitsbeiwerte erfordern, so dass jede Bemessungssituation mehrfach mit Ansatz verschiedener Teilsicherheitsbeiwerte berechnet werden muss. Außerdem sind gleiche Berechnungsschritte in verschiedenen Bemessungssituationen auch mit verschiedenen Teilsicherheitsbeiwerten zu belegen. Dies birgt nicht gleich ersichtliche Fehlerquellen sowie einen enorm gestiegenen Rechenaufwand. Bei einem kleinen Modell mag das nicht relevant sein, bei einem 3-D-FE-Modell, wie dem der Okertalsperre, bedeutet dies eine Vervielfachung einer ohnehin sehr langen Rechenzeit.

## 6 Zusammenfassung

Die Aufstellung von Zuverlässigkeitsnachweisen für Staumauern erfordert i.d.R. kontinuumsmechanische Berechnungen. Darin muss das Zusammenwirken von Bauwerk und Untergrund abgebildet werden. Bei der Modellierung ist es erforderlich, die Realität durch Idealisierungen abzubilden. Die Idealisierung betrifft alle Schritte der Zuverlässigkeitsnachweise. Der Grad der Detailgenauigkeit bei FE-Modellen für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Diese werden durch die Geometrie des Bauwerkes und die vorhandene Datengrundlage sowie durch die Notwendigkeit der gezielten Ergebnisauswertung in unterschiedlichen Bereichen des Modells gleichermaßen bestimmt. Dabei sind in Vorüberlegungen bereits alle Schritte als Komplex zu betrachten. Insgesamt ist festzustellen, dass sich durch Erfahrung und gezielte Überlegungen im Vorfeld der Modellerstellung umfangreiche Nacharbeit bzw. Überarbeitung oftmals vermeiden lässt. Je umfangreicher und komplizierter das Bauwerk, umso anspruchsvoller ist diese Aufgabe. Trotz aller genauen Überlegungen im Vorfeld, lässt es sich nicht immer vermeiden, einen ersten Rechnungslauf durchzuführen, um Problembereiche zu diagnostizieren und dann eine Überarbeitung des Modells entsprechend vorzunehmen.

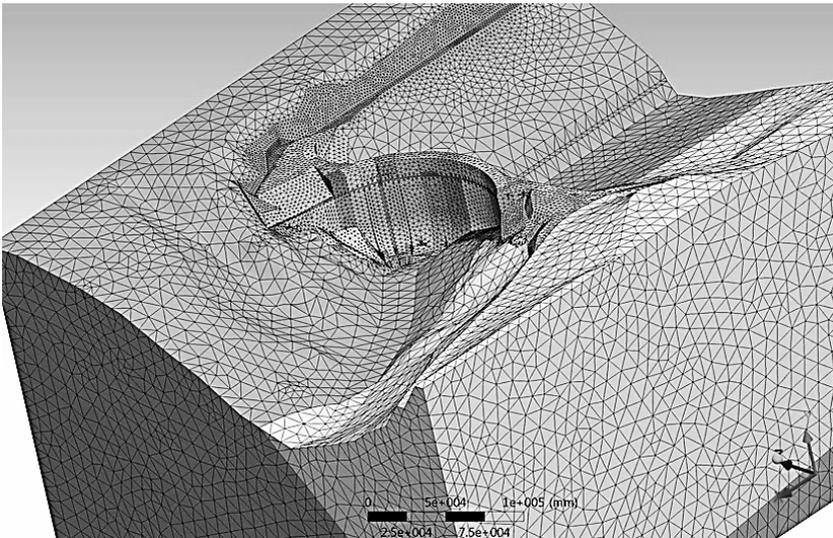


Abbildung 6: 3-D-FE-Gesamtmodell der Okertalsperre

## 7 Literatur

DIN 19700-11 (2004): Stauanlagen – Teil 11: Talsperren. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2004

DWA-M 542 (2017): Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten für Staudämme und Staumauern. Siebengebirgsdruck, Bad Honnef 2017

Autoren:

Dipl.-Ing. Kristina Aldermann  
Dipl.-Ing. Uwe Beetz

Dipl.-Ing. Christian Bellak

Tractebel Hydroprojekt GmbH  
Geschäftsbereich Dresden  
Mendelssohnallee 8  
01309 Dresden

Harzwasserwerke GmbH  
Abteilung Talsperren  
Nikolaistraße 8  
31137 Hildesheim

Tel.: +49 351 21123 32  
Fax: +49 351 21123 88  
E-Mail: kristina.aldermann@  
tractebel.engie.com  
uwe.beetz@  
tractebel.engie.com

Tel.: +49 5121 404 235  
Fax: +49 5121 404 220  
E-Mail: bellak@  
harzwasserwerke.de