

3-D-FE-Modellierung – Der Nachweis der Zuverlässigkeit nach DWA-M 542 am Beispiel der Okertalsperre

Dipl.-Ing. K. Aldermann
Dipl.-Ing. U. Beetz
Dipl.-Ing. C. Bellak

TRACTEBEL
Tractebel Hydroprojekt GmbH

ENGIE

Harzwasserwerke
herrlich weiches Wasser

With the trusted expertise of **LAHMEYER HYDROPROJEKT**

INTERNAL RESTRICTED CONFIDENTIAL

1

1

ÜBERSICHT

Kapitel 1	Okertalsperre
Kapitel 2	Normen und Regelwerke
Kapitel 3	Anwendung von FE-Modellen
Kapitel 4	FEM und TSK nach DWA-M 542
Kapitel 5	Zusammenfassung

16.06.2021

Tractebel Hydroprojekt GmbH

2

1

2

01

Okertalsperre

Tractebel Hydroprojekt GmbH

With the trusted expertise of LAHMEYER HYDROPROJEKT

16.06.2021
Tractebel Hydroprojekt GmbH

3

Okertalsperre

Allgemeine Informationen:

- Betreiber: Harzwasserwerke GmbH
- Bauzeit: 1952 - 1956
- Höhe über Gründungssohle: 75 m
- Kronenlänge: 260 m
- Kronenbreite: 8 m
- Speicherraum: 48,27 Mio. m³

➔ Die Okertalsperre gehört nach DIN 19700-11 zur Talsperrenklasse 1.

Bogenmauer – Block 1 - 10
Widerlager – W I – V
Schwergewichtsmauer – S I – VIII

16.06.2021
Tractebel Hydroprojekt GmbH

4



Normen und Regelwerke

TRACTEBEL
ENGIE

Tractebel Hydroprojekt GmbH

16.06.2021 Tractebel Hydroprojekt GmbH



With the trusted expertise of LAHMEYER HYDROPROJEKT

5

Normen und Regelwerke

DIN 19700-11 (2004): Stauanlagen – Teil 11

- Erfassung der Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund
- Nachweisführung nach dem Gesamtsicherheitskonzept
- Ansatz des Teilsicherheitskonzeptes möglich, mit der Bedingung der Einhaltung des gleichen Sicherheitsniveaus

DWA M 542 (2017): Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten für Staudämme und Staumauern

- Nachweisführung nach dem Teilsicherheitskonzept

➔ Die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes birgt zusätzlichen Aufwand bei Berechnungen mit der FEM für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern.

TRACTEBEL
ENGIE

16.06.2021 Tractebel Hydroprojekt GmbH

6

6

03

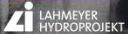
Anwendung von FE-Modellen

TRACTEBEL
ENGIE

Tractebel Hydroprojekt GmbH

16.06.2021 Tractebel Hydroprojekt GmbH




With the trusted expertise of  LAHMEYER HYDROPROJEKT

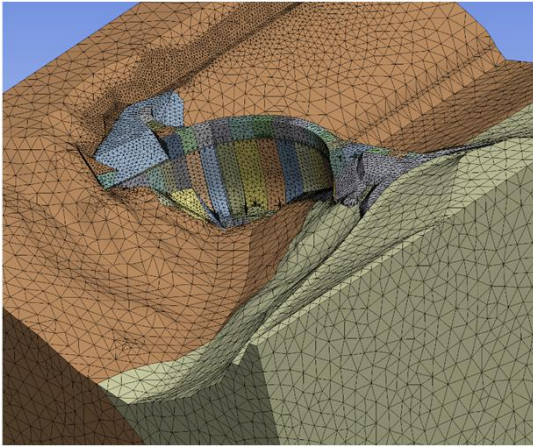
7

Anwendung von FE-Modellen

Die Grundlage von Standsicherheitsberechnungen von Staumauern ist ein Modell.

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

 Die Realität wird zum Modell.



DITBIM

TRACTEBEL
ENGIE

16.06.2021 Tractebel Hydroprojekt GmbH

8

8

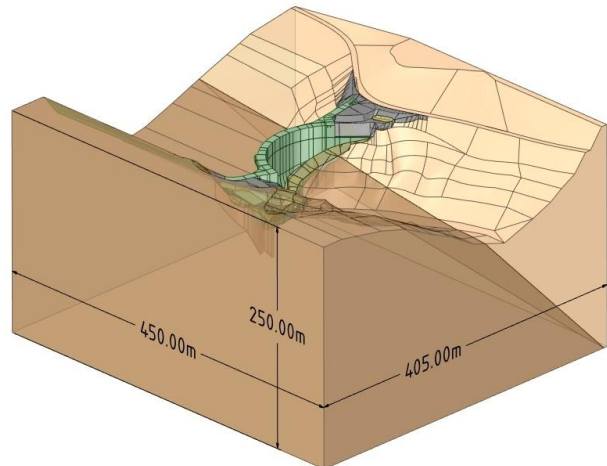
Anwendung von FE-Modellen

1. Erstellung des geometrischen Modells

3-D-FE-Modell:

- Abbildung der Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund
- Abbildung der Gebirgseigenschaften
- Abbildung der komplexen Bauwerksgeometrie

➔ Da sich bei einer Bogenstaumauer eine räumliche Tragwirkung einstellt, ist bei der Okertalsperre eine 3-D-Berechnung der gesamten Staumauer und des Untergrundes unerlässlich.



TRACTEBEL
ENGIE

16.06.2021

Tractebel Hydroprojekt GmbH

9

9

Anwendung von FE-Modellen

2. Randbedingungen am geometrischen Modell

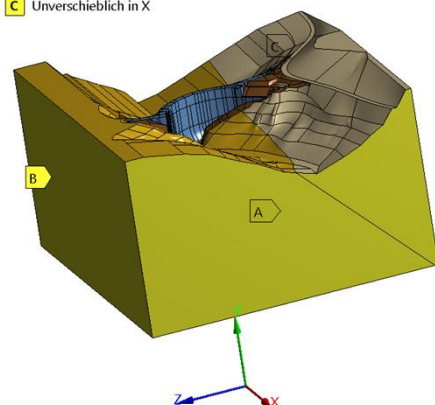
➔ 3-D-FE-Modell:

- unterer Modellrand: festes Auflager
- seitliche Modellränder: unverschieblich in Richtung der Flächennormalen

➔ 2,5-D-FE-Modell:

- unterer Modellrand: festes Auflager
- seitliche Modellränder in Scheibenebene: unverschieblich in Richtung der Flächennormalen
- seitliche Modellränder senkrecht zur Scheibenebene: Kopplung der Scheibenränder

- A Festes_Auflager_unten
- B Unverschieblich in Z
- C Unverschieblich in X



TRACTEBEL
ENGIE

16.06.2021

Tractebel Hydroprojekt GmbH

10

10

Anwendung von FE-Modellen

3. Auswahl von Stoffmodellen und Bestimmung der Materialkennwerte

Maßgebend für den Untergrund:

- Modellierung der Trennflächenscharen
- Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit werden maßgeblich durch die Sickerströmung im Fels beeinflusst

Maßgebend für das Absperrbauwerk:

- Örtliche Reduzierung der Festigkeit in vorhandenen Fugen
- Einhaltung der Forderung über die Zugausschaltung in vertikaler Richtung

Eigenschaften von Übersichtszeile 6: Grauwacke_TWBA		
	A	B
1	Eigenschaft	Wert
2	Field Variables des Materials	Tabelle
3	Dichte	2450
4	Isotroper Koeffizient der thermischen Ausdehnung (Sekante)	
5	Koeffizient der thermischen Ausdehnung	5E-06
6	Isotrope Elastizität	
7	Ableiten von	E-Modul u...
8	E-Modul	4800
9	Querkontraktionszahl	0.2
10	Kompressionsmodul	2.6667E+09
11	Schubmodul	2E+09
12	Jointed Rock	
13	Kopplung der Restfestigkeit	
14	Kopplung der Restfestigkeit	Keine Kop...
15	Fließfläche	

Die Materialeigenschaften, beschrieben durch Kennwerte für wahrscheinliche und ungünstige Bedingungen, werden in zugehörigen Bemessungssituationen betrachtet.

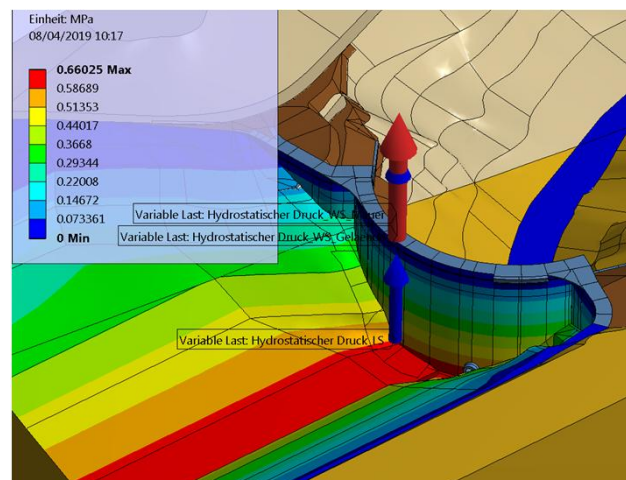
11

Anwendung von FE-Modellen

4. Beschreibung der Einwirkungen

- Abbildung der Einwirkungen nacheinander in einzelnen Lastschritten
- Berücksichtigung der zeitlichen Reihenfolge
- Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte innerhalb der Berechnung

Die Kombination der einzelnen Einwirkungen wird innerhalb der jeweiligen Bemessungssituation untersucht.



12

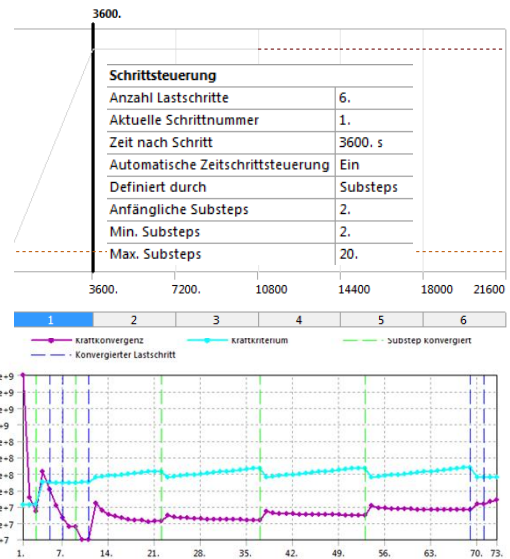
Anwendung von FE-Modellen

5. Steuerung der Berechnung

Die Lösung einer nichtlinearen Rechnung erfolgt iterativ. Wichtige Kriterien sind:

- Spannungsumlagerung bis zum Erreichen eines stabilen Zustandes
- Festlegen von Abbruchkriterien (z.B. Restlastgröße)
- Auswahl des Gleichungslösers

→ Die Steuerung der Iteration beeinflusst die Qualität der Ergebnisse, die Rechenzeit und den Speicherplatzbedarf maßgebend.



13

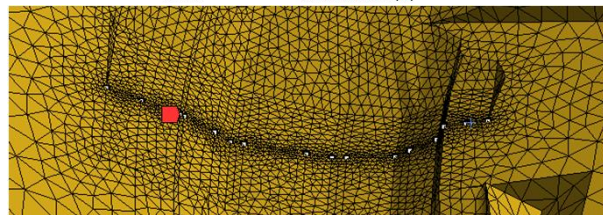
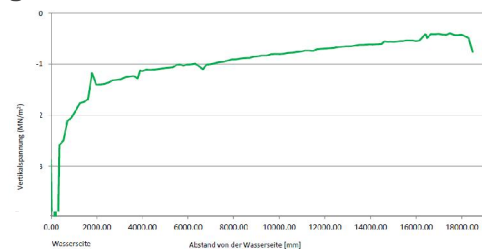
Anwendung von FE-Modellen

6. Auswertung und Visualisierung der Berechnungsergebnisse

Feinere Vernetzung notwendig bei:

- Bereichen mit großen Gradienten der Zustands- und Wirkungsgrößen
- Problembereichen im Untergrund
- Orten, an denen die maßgebenden Nachweise für den Zuverlässigkeitsnachweis geführt werden

→ Um eine gezielte Ergebnisauswertung vornehmen zu können, muss schon in der Modellierungsphase hierauf Einfluss genommen werden.



14

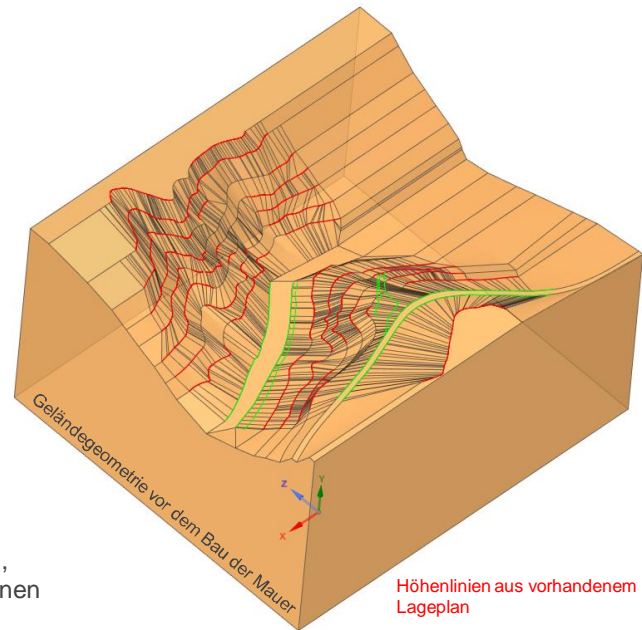
Anwendung von FE-Modellen

Zusammenspiel von Datengrundlage und Idealisierungsgrad

Berücksichtigung der Belastungsgeschichte:

1. Geländegeometrie vor dem Bau der Mauer (Grundlage Höhenlinien aus vorhandenem Lageplan)
2. Gelände mit Baugrubenaushub
3. Bau der Staumauer mit Geländeanpassung

➔ Eine hohe Detailgenauigkeit ist nur dann sinnvoll, wenn die Grundlage auf vorhandenen Informationen und nicht auf Annahmen beruht.



TRACTEBEL
ENGIE

16.06.2021

Tractebel Hydroprojekt GmbH

15

15

04

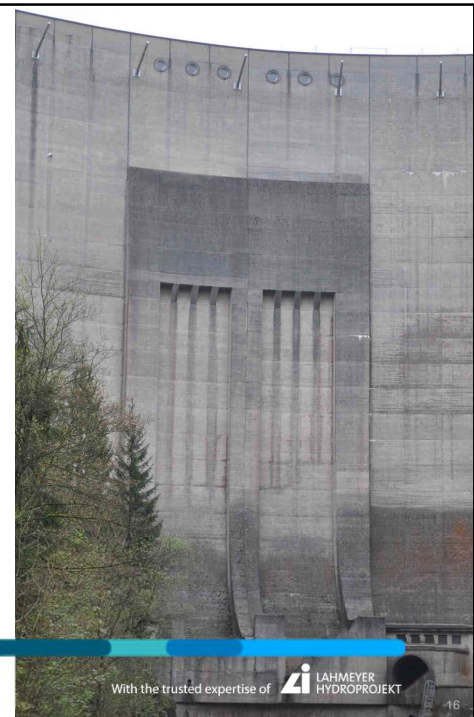
FEM und TSK nach DWA-M 542

TRACTEBEL
ENGIE

Tractebel Hydroprojekt GmbH

16.06.2021

Tractebel Hydroprojekt GmbH



16

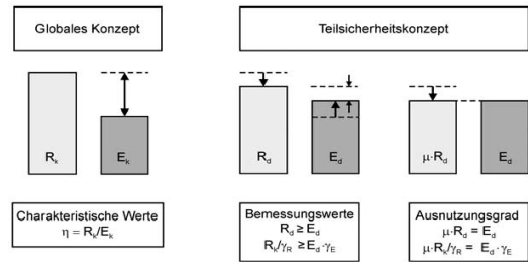
16

FEM und TSK nach DWA-M 542

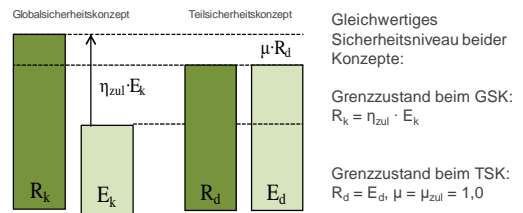
Maßgebende Änderungen

- Bisherige Teilsicherheitsbeiwerte (TSB) werden nun auf der Einwirkungsseite berücksichtigt
- Definition konkreter Bemessungssituationen (BS) für die Nachweise im GZG
- Nachweis einer Mindestdruckzone ersatzweise statt Lage der Resultierenden im GZT
- Abweichung zum EC 0: Ansatz der TSB der BS A

➔ Vergleichbares Sicherheitsniveau zur Anwendung des GSK nach DIN19700-11.



Schematische Darstellung der Vorgehensweise beim globalen Sicherheitskonzept und beim Teilsicherheitskonzept aus ZIEGLER (2008:10)



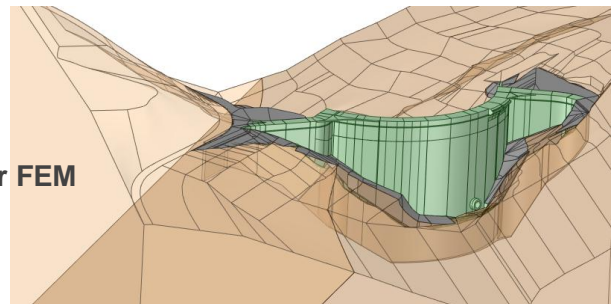
Schematische Darstellung bei gleichem Sicherheitsniveau aus Diplomarbeit K. Martin (2013)

FEM und TSK nach DWA-M 542

Auswirkung bei der Anwendung innerhalb der FEM

- Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte bei den Materialeigenschaften und den Einwirkungen **bereits innerhalb der Berechnung**
- Berechnung **aller Lastschritte** in jeder Bemessungssituation notwendig

➔ Die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes bei FEM-Berechnungen von Staumauern birgt nicht gleich ersichtliche Fehlerquellen sowie einen enorm gestiegenen Rechenaufwand.



Nachweiskriterium	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
Druckfestigkeit bei unbewehrtem Beton, Bruchsteinmauerwerk und Fels	γ_M	2,1	1,7	1,2
Kraftübertragung im Bauwerk, in Arbeitsfugen des Bauwerks, in der Aufstandsfläche und im Untergrund	γ_{ϕ}, γ_C	1,5	1,3	1,2
Kraftübertragung auf Trennflächen im Untergrund	γ_{ϕ}, γ_C	2,0	1,5	1,2
Mindestdruckzone in % der Querschnittsfläche		70%	50%	40%

Teilsicherheitsbeiwerte und Nachweiskriterien auf der Materialeite bzw. der Widerstandsseite im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) aus DWA-M 542 (2017: 07)

05

Zusammenfassung

TRACTEBEL
ENGIE

Tractebel Hydroprojekt GmbH

16.06.2021 Tractebel Hydroprojekt GmbH



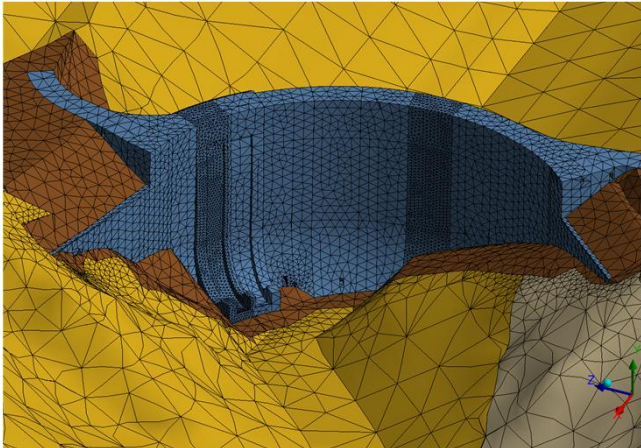
With the trusted expertise of **LAHMEYER HYDROPROJEKT**

19

Zusammenfassung

- Abbildung des Zusammenwirkens von Bauwerk und Untergrund
- Abbildung der Realität durch Idealisierungen in allen Schritten der Zuverlässigkeitsnachweise
- Beeinflussung der Detailgenauigkeit bei FE-Modellen für Zuverlässigkeitsnachweise von Staumauern durch verschiedene Faktoren
- Betrachtung aller Schritte als Komplex

➔ 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.



TRACTEBEL
ENGIE

16.06.2021 Tractebel Hydroprojekt GmbH

20

20



VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

Tractebel Hydroprojekt GmbH
Geschäftsbereich Dresden
Mendelssohnallee 8
01309 Dresden

Harzwasserwerke GmbH
Abteilung Talsperren
Nikolaistraße 8
31137 Hildesheim

TRACTEBEL
ENGIE
Tractebel Hydroprojekt GmbH

Harzwasserwerke
herrlich reines Wasser

PUBLIC INTERNAL RESTRICTED CONFIDENTIAL

With the trusted expertise of **LAHMEYER HYDROPROJEKT**

Tractebel Hydroprojekt GmbH 21