

1 Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inhaltsverzeichnis | 2 |
| 2 | Problembeschreibung | 4 |
| 3 | Das Berechnungsmodell | 5 |
| 3.1 | Geometrie und Randbedingungen | 5 |
| 3.1.1 | Systemart und Randbedingungen | 5 |
| 3.1.2 | Grafische Ausgabe der Strukturkanten | 7 |
| 3.2 | Boden-Struktur Interaktion | 8 |
| 3.3 | Materialien | 8 |
| 3.3.1 | Modellierung des Mauerwerk-Staukörpers | 8 |
| 3.3.2 | Modellierung des Untergrundes | 9 |
| 3.3.3 | Materialieneingabe mit AQUA | 9 |
| 3.3.4 | Materialeingabe mit WINAQUA / SOFIPLUS | 9 |
| 3.3.5 | Grafische Ausgabe der Materialeigenschaften | 11 |
| 4 | Der Ausgangszustand | 13 |
| 5 | Durchströmung – vom Potenzial zur Last..... | 15 |
| 5.1 | Berechnung der Durchströmung mit HYDRA | 15 |
| 5.2 | Einlesen der Lasten aus Durchströmung in TALPA | 16 |
| 5.3 | Grafische Ausgabe der Durchströmung | 18 |
| 6 | Beanspruchung aus Temperatur | 20 |
| 6.1 | Temperaturdifferenzen im Jahresgang | 20 |
| 6.1.1 | Berechnung des Temperatúrausgangszustands mit HYDRA | 20 |
| 6.1.2 | Grafische Ausgabe des Temperatúrausgangszustands | 21 |
| 6.1.3 | Instationäre Berechnung des Temperaturjahresgangs mit HYDRA | 22 |
| 6.1.4 | Ausgabe von Zeitfunktionen an einzelnen Punkten mit DYNR | 24 |
| 6.1.5 | Grafische Auswertung des Jahresganges mit WING | 24 |
| 6.1.6 | Ablaufen der einzelnen Bilder als Animation mit WINGKX (Film) | 26 |
| 6.2 | Temperaturdifferenz als Strukturlast | 27 |
| 6.2.1 | Einlesen der Temperaturen in TALPA | 27 |
| 6.2.2 | Visualisierung der Spannungen nach Temperatur-Jahresgang mit WING28 | |
| 7 | Eisdruck | 29 |
| 7.1 | Ermittlung des Lastbildes und Eingabe mit SOFILOAD | 29 |
| 7.2 | Kontrolle des Lastbildes mit WING | 29 |
| 7.3 | Berechnung mit TALPA | 30 |
| 8 | Erdbebenbelastung..... | 31 |
| 8.1 | Definition des Antwortspektrums | 31 |
| 8.2 | Eigenformen der Struktur | 31 |
| 8.3 | Von Eigenform und Response-Faktor zur Strukturlast | 32 |

Kurzfassung

In diesem Aufsatz soll das Zusammenwirken verschiedener Module der SOFiSTiK Programmkette zur rechnerischen Behandlung geotechnischer Fragestellungen dargestellt und erläutert werden. Als Beispiel dient dazu die rechnerische Beurteilung der Standfestigkeit einer Schwergewichts-Staumauer unter Berücksichtigung verschiedener physikalischer Einwirkungen wie Durchströmung, Temperaturbeanspruchung und Erdbeben. Das Hauptaugenmerk soll dabei auf der rechnerischen Erfassung der relevanten physikalischen Vorgänge und ihrer Wirkung auf die Struktur liegen. Die Geometrie der Struktur wurde bewusst einfach gehalten, so dass Erläuterungen zur Systemeingabe sich auf wesentliche Charakteristika beschränken.

Im Einzelnen werden folgende SOFiSTiK-Module verwendet:

- TALPA
→ Strukturmechanik
- HYDRA
→ Durchströmung und Wärmekonvektion
- DYNA
→ Berechnung der Eigenmoden und Antwortspektren
- WINGRAF / WING
→ Grafische Darstellung von Systemdaten und Ergebnissen
- SOFIPLUS / SOFIMSHB / (WIN)AQUA / SOFILOAD
→ Systemeingabe, Materialspezifikation, Strukturlasten

2 Problembeschreibung

Untersucht wird die Standfestigkeit einer Schwergewichts-Staumauer. Die Staumauer ist ein 32,50 m hoher und im Fußpunkt ca. 21 m breiter Mauerwerkskörper mit einem innenliegenden Wartungsstollen. Zur Wasserseite ist sie mit einer Vorsatzmauerschale versehen. Der ebenfalls auf der Wasserseite angeordnete „Intze-Keil“ aus verdichtetem Lehm dient der Abdichtung und verhindert die Bodenerosion in der Umgebung des Staumauerfußpunktes. Im Bereich des Bauwerks steht in den unteren Lagen standfester Fels an, überlagert von einer 10 m mächtigen Schicht aus verwittertem, geklüftetem Fels, die zugleich als Gründung für die Staumauer dient. Die abschließende 2,5 m mächtige Talbodenschicht besteht überwiegend aus rolligen Kiesen und Sanden.

Zur Beurteilung der Standfestigkeit der Staumauer werden exemplarisch folgende Lastfälle untersucht:

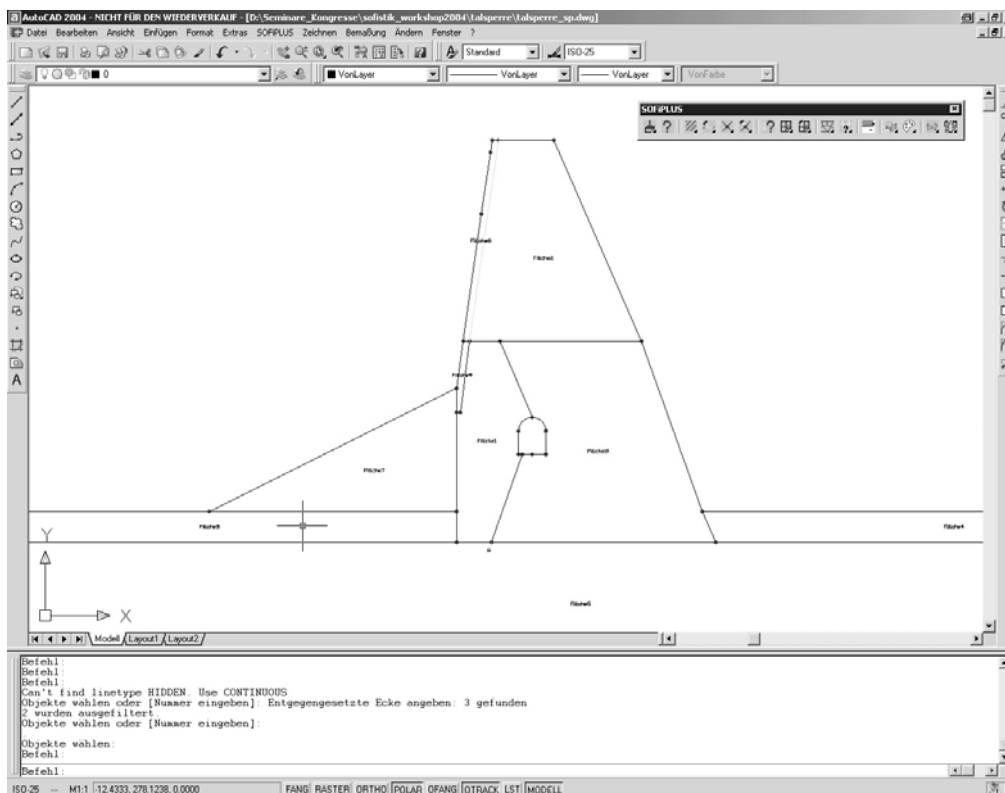
- Durchströmung
- Temperaturbeanspruchung
- Eisdruck
- Erdbeben

Die rechnerische strukturmechanische Betrachtung erfolgt mit Hilfe eines Finite Element Berechnungsmodells an einem ebenen Schnitt in der Mitte des Staukörpers (→ ebener Dehnungszustand). Der Berechnungsausschnitt wird so gewählt, dass neben dem Staukörper auch ein ausreichend großer Bereich des anstehenden Bodens – unter Berücksichtigung des geschichteten Aufbaus – erfasst wird.

3 Das Berechnungsmodell

3.1 Geometrie und Randbedingungen

Die Eingabe der System-Geometrie kann wahlweise grafisch interaktiv mit SOFIPLUS oder über CADINP (Teddy) mit SOFIMSHB erfolgen, die eigentliche Geometrie-Spezifikation soll jedoch hier nicht Gegenstand der Betrachtung sein.



Im folgenden werden kurz einige für die Berechnung relevante Besonderheiten herausgestellt.

3.1.1 Systemart und Randbedingungen

Zunächst erfolgt die Spezifikation der Systemart, in diesem Fall ein ebener Dehnungszustand. Im Hinblick auf die Definition der Randbedingungen für die Strömungs- und Temperaturberechnung mit HYDRA ist es ferner wichtig, die relevanten Strukturkanten als Ränder anzulegen. Die entsprechende Eingabe mit SOFIMSHB lautet:

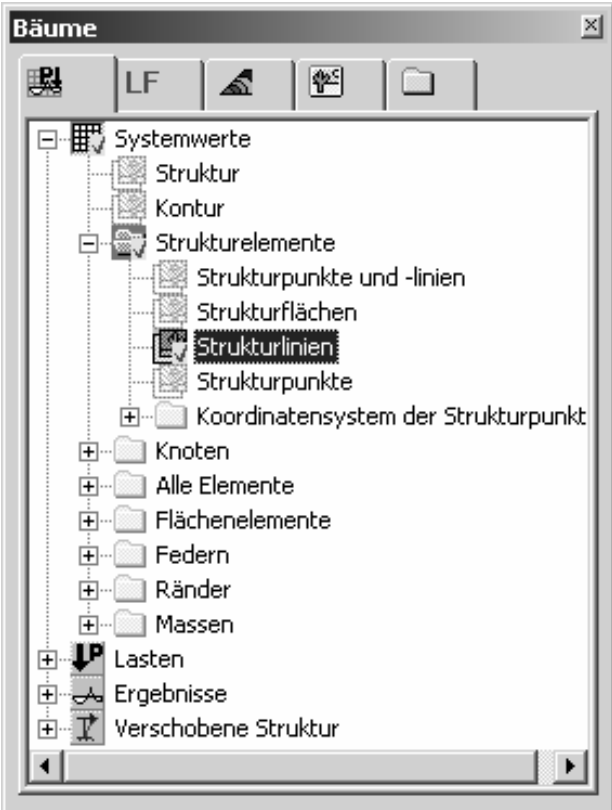
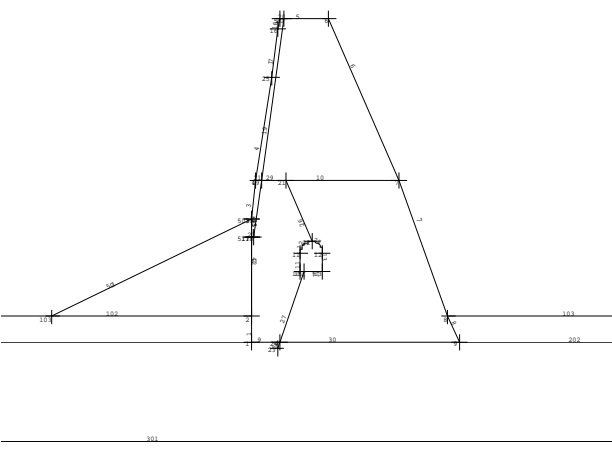
| TEDDY – Eingabe | Erläuterung |
|------------------------|---|
| SYST ART EDEH GDIR NEG | SYST ART EDEH – Auswahl des ebenen Dehnungszustandes, der auch die |

| | |
|--------------------|---|
| | <p>Spannungskomponente senkrecht zur Modellebene (in Z-Richtung) berücksichtigt.</p> <p>GDIR NEG Y – Bei Angabe von Höhenwerten über NN ist es sinnvoll, die Eigengewichtsrichtung negativ auszurichten</p> |
| GLN GRP 10 | <p>GLN – Durch Angabe einer Gruppennummer GRP werden Strukturkanten zu Rändern, die zur Aufbringung der Strömungs-Randbedingungen in HYDRA benötigt werden.</p> <p>Diese Randbedingungen sind bei der geometrischen Anordnung / Verteilung der Ränder zu beachten</p> |

Oder alternativ mit SOFIPLUS:

| Interaktive Eingabefenster | Erläuterung |
|----------------------------|---|
| | <p>Statische Position – Allgemeine Systemeinstellungen</p> |
| | <p>Eigenschaften der Strukturkante – Festhaltungen – linear elastische Festhaltung</p> <p>Ränder legt SOFIPLUS zur Zeit nur an, wenn man den Strukturkanten eine (sehr kleine) elastische Bettung zuweist.</p> |

3.1.2 Grafische Ausgabe der Strukturkanten

| Eingabe | Erläuterung |
|---|--|
| <p>TEDDY – Eingabe mit WING: STRU MESH SCHR 0.1</p> | <p>STRU MESH – Für die HYDRA-Eingabe ist eine Übersicht über die Anordnung der Strukturkanten und ihrer Nummerierung sinnvoll</p> |
| <p>Interaktive WINGRAF – Eingabe:</p>  | <p>Statt des Eingabefensters kann zur Auswahl des gewünschten Ausgabewertes auch der Ergebnisbaum verwendet werden.</p> |
|  | <p>Grafische Darstellung der Strukturlinien</p> |

3.2 Boden-Struktur Interaktion

Hinsichtlich der Boden-Struktur Interaktion ist insbesondere die Modellierung der Grenzschicht zwischen Intze-Keil und Mauerwerkskörper interessant. Um die Einführung künstlicher Zugspannungen in das System zu vermeiden – die sich bei einer nichtlinearen Berechnung besonders störend bemerkbar machen können (→„Anhängen des Erdkörpers an das Mauerwerk“) – kommt es insbesondere darauf an, ein Abgleiten des Intze-Keils am Mauerwerkskörper zu ermöglichen. Dies wird durch die Einführung nichtlinearer Interface-Federelemente (Reibung, Riss) zwischen den angrenzenden Strukturkanten beider Körper erreicht.

| TEDDY – Eingabe | Erläuterung |
|---|--|
| <pre> MAT 8 BEZ 'Interface' BMAT 8 C 50000 CQ 5000 RISS 0.1 MUE 0.4 : GLN 42 517 2 FIX '->2' MAT 8 BFIX 1 </pre> | <p>Die Strukturkante 42 wird mit der Strukturkante 2 gekoppelt. Dadurch erfolgt eine gleichartige Unterteilung bei der Vernetzung. Die Eigenschaften des Interfaces werden durch das Bettungsmaterial 8 beschrieben. Die Referenzbreite BFIX dient zur Umrechnung der Bettungskonstanten in Einzelfederkonstanten.</p> |

3.3 Materialien

Die Materialmodellierung erfolgt unter Berücksichtigung der nichtlinearen Stoffeigenschaften als Kontinuum.

3.3.1 Modellierung des Mauerwerk-Staukörpers

Für die Beurteilung der Standsicherheit der Staumauer für die untersuchten Lastspektren empfiehlt sich eine adäquate Modellierung der nichtlinearen Mauerwerkeigenschaften. Für die Berechnung wird ein reduzierter Schubverbund in den horizontalen Mauerwerksfugen sowie fehlender Zugverbund senkrecht zu diesen Fugen angesetzt. Die entsprechende Modellierung erfolgt mit dem Kluftmaterial FAUL. Mit FAUL lassen sich attributiv zum Basismaterial bis zu drei gerichtete Versagensflächen definieren, in denen die Schub- und Zugübertragung begrenzt werden kann. Die Zugbegrenzung erfolgt über ein Zugschädigungsmodell. Der Schädigungswert (dimensionslos) wird in der Datenbasis gespeichert,

dementsprechend können gerissene Bereiche beim Post-Processing visualisiert werden. Im betrachteten Fall wird keine Zugübertragung über die horizontalen Fugen erlaubt und der Schub auf maximal 1000 kN/m² begrenzt.

Die Festigkeit des Basismaterials wird über einen allgemeinen elasto-plastischen Ansatz (Drucker-Prager) beschrieben, entsprechend einer einachsigen Druckfestigkeit von 3800 kN/m². Zug wird auch hier nicht zugelassen.

3.3.2 Modellierung des Untergrundes

Die Modellierung des Untergrundes erfolgt unter Verwendung des Mohr-Coulomb Materialmodells. Für den Bereich des verwitterten Felsens ist zusätzlich eine geneigte Kluft vorgesehen.


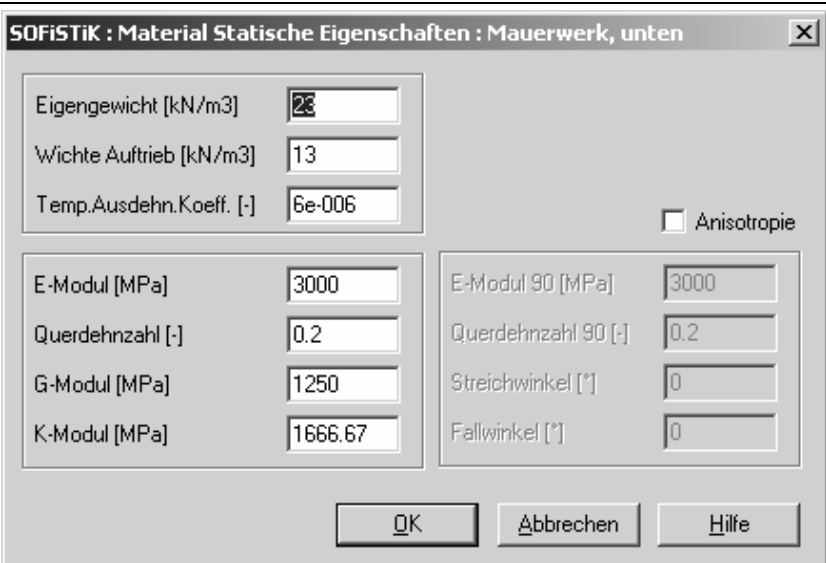
| | Talgrund | Verw. Fels | Fels | Intze-Keil |
|--|----------|------------|------|------------|
| Basismaterial | | | | |
| Reibungswinkel φ [°] | 27,5 | 5 | 5 | 27,5 |
| Kohäsion c [kN/m ²] | 0 | 800 | 800 | 20 |
| Zugfestigkeit f_t [kN/m ²] | 0 | 300 | 300 | 0 |
| Dilatanzwinkel ψ [°] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kluft | | | | |
| Reibungswinkel φ [°] | - | 35 | - | - |
| Kohäsion c [kN/m ²] | - | 390 | - | - |
| Zugfestigkeit f_t [kN/m ²] | - | 150 | - | - |
| Dilatanzwinkel ψ [°] | - | 0 | - | - |
| Kluftneigung [°] | - | 72 | - | - |

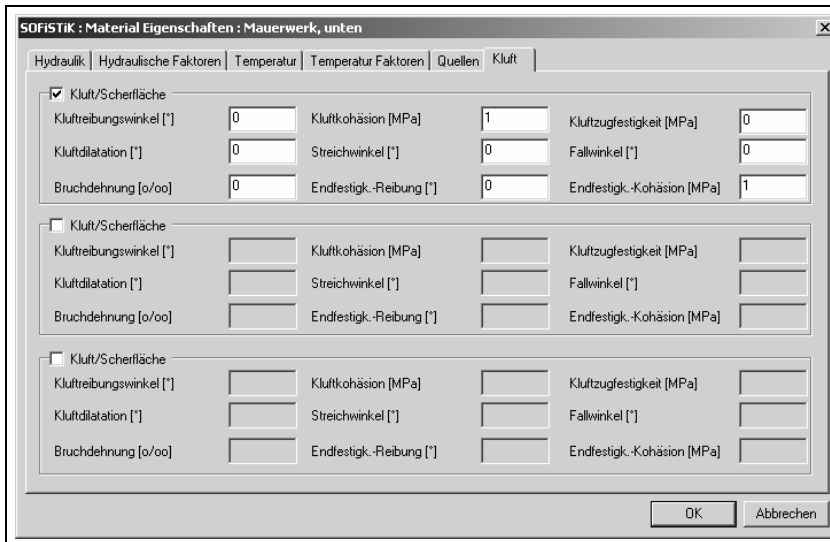
3.3.3 Materialieneingabe mit AQUA

| TEDDY - Eingabe | | | | | | | Erläuterung | |
|-----------------|------|-----|------|--------|---------|--|---|--|
| NORM DIN 1045 | | | | | | | NORM – ab den 21'-Versionen ist die Eingabe einer Norm praktisch zwingend erforderlich, damit diverse Voreinstellungen (aus INI-Dateien) und Programme (z.B. WINAQUA) funktionieren. | |
| MAT NR | E | MUE | GAM | ALFA | BEZ | MAT – Lineare Materialeigenschaften | | |
| 1 | 3e6 | 0.2 | 23 | 0.6e-5 | 'Mauer' | | | |
| NMAT NR | ART | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | NMAT – Nichtlineare Materialeigenschaften | |
| 1 | MISE | 556 | 0.49 | - | 0 | - | ART MISE – Materialgesetz van Mise / | |

| | | | | | | | |
|---|------|---|------|---|---|---|---|
| 1 | FAUL | 0 | 1000 | - | - | 0 | Drucker Prager ART FAUL – Klüfte im Material, hier verwendet, um die horizontalen Mauerfugen abzubilden |
|---|------|---|------|---|---|---|---|

3.3.4 Materialeingabe mit WINAQUA / SOFIPLUS

| Interaktive Eingabefenster | Erläuterung |
|--|---|
|  | <p>Allgemeine Eigenschaften des Materials</p> |
|  | <p>Eigenschaften... – enthält die linearen Materialeigenschaften</p> |

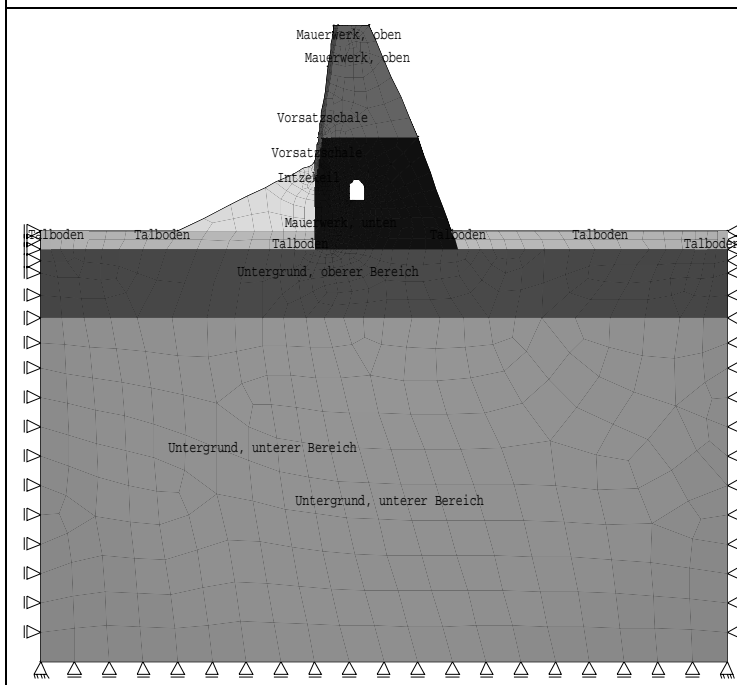
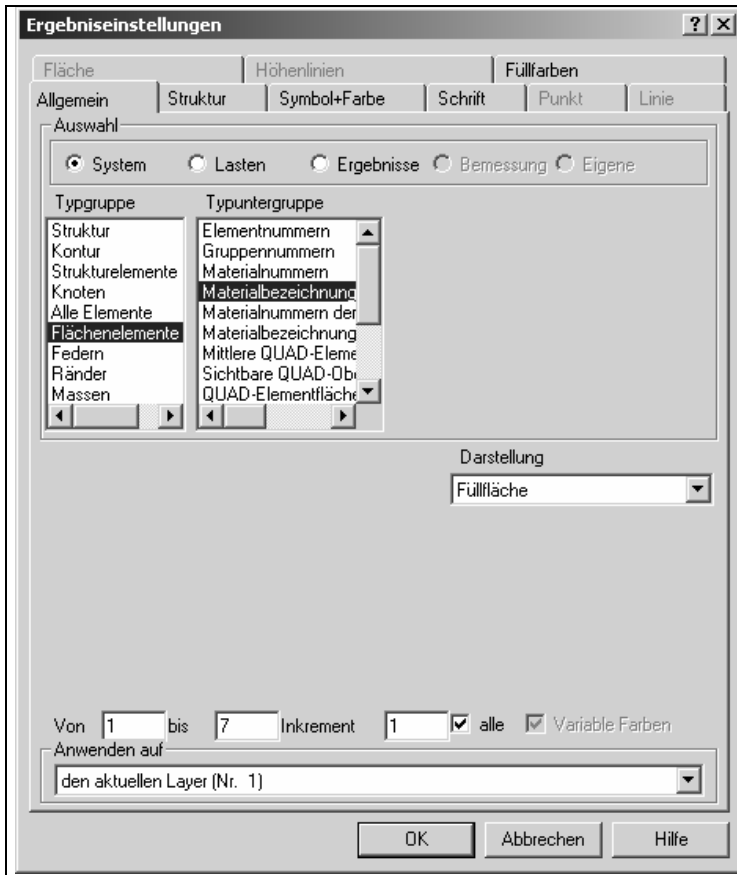


Spezial... – enthält spezielle attributive Materialeigenschaften, hier die Kluftflächen (= horizontale Mauerfuge)

3.3.5 Grafische Ausgabe der Materialeigenschaften

| Eingabe | Erläuterung |
|--|--|
| <p><u>TEDDY – Eingabe mit WING:</u> STRU MATL FILL FLAE SCHR 0.3</p> | <p>STRU – Ausgabe von System- und Materialeigenschaften, es sind hauptsächlich die linearen Materialeigenschaften ausgebenbar</p> |

| Eingabe | Erläuterung |
|--|--|
| <p><u>Interaktive WINGRAF – Eingabe:</u></p> | <p>Ausgabe der Systemwerte unter "System" – Elementart – Ausgabewert</p> |



Grafische Darstellung der Materialverteilung

4 Der Ausgangszustand

Für eine Material-nichtlineare Berechnung ist die Erzeugung eines plausiblen Ausgangs-Spannungszustandes von besonderer Bedeutung., da er als Primärzustand für die nachfolgenden Lastsimulationen dient und somit das nichtlineare Materialverhalten direkt beeinflusst.

Für das betrachtete Beispiel erfolgt die Generierung des Ausgangs-Spannungszustandes in drei aufeinanderfolgenden Schritten:

- LF1: Berechnung des Spannungszustandes für die Felsschichten (Gruppen 4 und 5) unter Eigengewicht bei einem Seitendruckbeiwert von $K=0.8$
- LF 2: Zusätzliche Aktivierung des Mauerwerkskörpers unter Eigengewicht (Gruppen 1, 2 und 7)
- LF3: Aktivierung des Intze-Keils und der oberen Talbodenlage unter Eigengewicht sowie der Interface Elemente (Gruppen 3, 6 und 0)

Die strukturmechanische Berechnung erfolgt mit TALPA. Nachfolgend ist exemplarisch die Berechnungssteuerung für den Lastfall 2, Aktivierung des Mauerwerkskörpers erläutert.

| TEDDY - Eingabe | | | | | | | | Erläuterung |
|-----------------|----|------|------|------|-----|------|------|--|
| SYST PROB NONL | | | | | | | | PROB NONL – Material-nichtlineare Berechnung |
| STEU ITER 40 | | | | | | | | ITER 40 – max. 40 Iterationen pro Lastschritt zulässig. Die voreingestellte relative Toleranzgrenze für die Restkräfte liegt bei 0,1 %. |
| GRUP | NR | WERT | FAKS | FAKG | PLF | FAKL | FAKP | WERT – VOLL = Gruppe aktiv mit Ausgabe. NEIN = Gruppe deaktiviert. Hier werden zusätzlich zu den bereits im LF 2 aktiven Gruppen die Gruppen 3, 6 und 0 (Intze-Keil, Talboden und Interface) aktiviert. FAKS – Faktor für die Steifigkeit, im Normalfall 1.0 FAKG – Faktor für das Eigengewicht, im Normalfall 1.0 PLF – Nummer des Primärlastfalls, auf dessen Spannungszustand die Gruppe aufsetzt. FAKL, FAKP – Faktoren für die |
| | 4 | voll | 1.0 | 1.0 | 2 | 1.0 | 1.0 | |
| | 5 | voll | 1.0 | 1.0 | 2 | 1.0 | 1.0 | |
| | 3 | voll | 1.0 | 1.0 | 0 | - | - | |
| | 1 | voll | 1.0 | 1.0 | 2 | 1.0 | 1.0 | |
| | 2 | voll | 1.0 | 1.0 | 2 | 1.0 | 1.0 | |
| | 7 | voll | 1.0 | 1.0 | 2 | 1.0 | 1.0 | |
| | 0 | voll | 1.0 | 1.0 | 0 | - | - | |
| | 6 | voll | 1.0 | 1.0 | 0 | - | - | |

| | |
|---|---|
| | Übernahme der ‚inneren‘ Reaktionskräfte bzw. der Spannungen aus dem PLF. Bei nichtlinearen Berechnungen immer FAKL= FAKP! Nichtlineare Berechnungen außerdem unter Ansatz der Gesamlasten, daher FAKL= FAKP= 1.0 (Ausnahme: Bodenentspannung, α -Verfahren im Tunnelbau) |
| LF NR 3 BEZ '...talboden und intzekeil' | NR – Nummer des Lastfalls. BEZ – Bezeichnung |

| Ergebnis-Darstellung LF 3 | Erläuterung |
|---------------------------|--|
| | An der Grenzschicht zwischen Intze-Keil und Staumauer erkennt man deutlich die Relativverschiebung der Interface-Knoten („Gleiten des Keils am Bauwerk“) |

5 Durchströmung – vom Potenzial zur Last

Die Strömung des Grundwassers lässt sich als Potenzialproblem beschreiben. HYDRA ist auf die Berechnung dieses Problemkreises spezialisiert, kann aber auch andere Probleme dieser Art behandeln. Grundlage ist die Finite Element Methode.

Erforderlich für die Berechnung ist mindestens die Angabe des Materialwerts der Durchlässigkeit. Als Randbedingung werden die Potenziale (die Höhe) des Wasserspiegels vorgegeben. Bei einer stationären Berechnung (d.h. ohne Zeitlimit) stellt sich der Freispiegel des Grundwassers vom höheren zum niedrigeren Potenzial ein. Aus dem Druck, der aus dieser Grundwasserströmung resultiert, und dem Auftrieb lassen sich dann entsprechende Lasten generieren.

5.1 Berechnung der Durchströmung mit HYDRA

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|-----------------------|---|
| SYST DIMT SEC DIMQ M3 | DIMT SEC – Ein- und Ausgabeeinheit der Zeit DIMQ M3 – Ein- und Ausgabeeinheit der Menge, entscheidet darüber, welche Art von Potenzialproblem vorliegt (M3 =Grundwasserströmung) |
| STEU FROB 1 | FROB 1 – Beim Ermitteln der Potenziale soll der Freispiegel berücksichtigt werden |
| MAT 1 KXX 1.E-6 | MAT – Hydraulische Materialwerte können auch temporär innerhalb von HYDRA definiert werden KXX – Isotrope Durchlässigkeit (m/sec) hier nicht verwendete weitere angebbare Werte: KYY, KZZ... – Anisotrope Durchlässigkeiten S – Spezifischer Speicherkoeffizient (1/m) NSP – Nutzbarer Hohlraumanteil |
| GRUP - LAST DRUC | LAST DRUC – Für alle angegebenen Gruppen werden Lasten aus Auftrieb und Strömungsdruck in der Datenbank gespeichert weitere mögliche Lastarten: |

| | |
|---|---|
| | <p>LAST AUFT – Lasten nur aus Auftrieb</p> <p>LAST STRO – Lasten nur aus Strömungsdruck</p> |
| RAND TYP H VAL 309.29 VON 10001 DELT GLNS | <p>RAND – Linienhafte Randbedingung, es können aber auch nur einzelne Knoten verwendet werden</p> <p>TYP H – Standrohrspiegel (VAL in m), das Potenzial kann aber nie größer als die geo-metrische Höhe (hier $-Y$) des Knotens werden.</p> <p>DELT GLNS – geordnete Knoten des Randes, der bei VON definiert wurde. Die korrekte (geordnete, "aufgefädelt") Reihenfolge der Knoten ist immer dann wichtig, wenn die Randbedingung sich auf die Länge des Randes (die Abstände der einzelnen Knoten) bezieht.</p> |
| LF 95 | <p>LF – Lastfallnummer unter der die Potenziale und Lasten aus Durchströmung gespeichert werden sollen.</p> |
| KNOT 1 KP 2 | <p>Besonderheit in diesem Beispiel: Parallele Knotenreihen, die nicht miteinander verbunden sind, wirken undurchlässig.</p> <p>KNOT KP – Bewirkt einen hydraulischen Kurzschluss (ohne Verluste), die Potenziale beider Knoten werden (starr) gekoppelt hier nicht verwendet:</p> <p>LINK – Verbindung zweier Knoten mit Berücksichtigung der Querschnittsgröße, Rauigkeit und Verlusten (in der Wirkung wie eine Feder in der Statik)</p> |

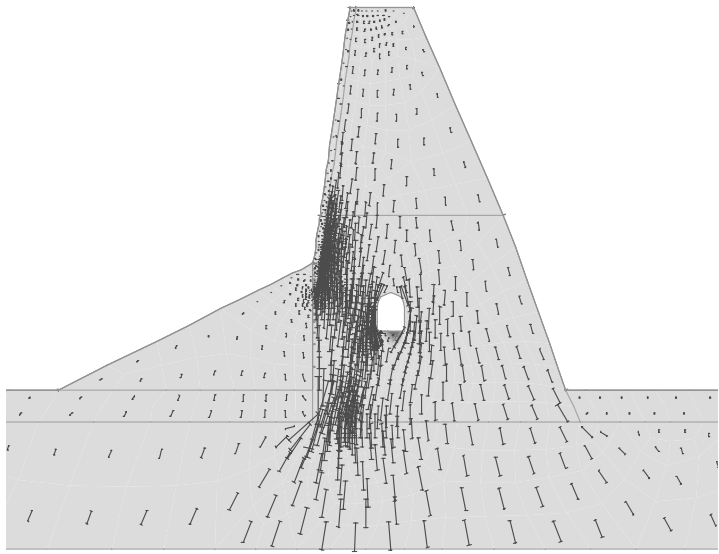
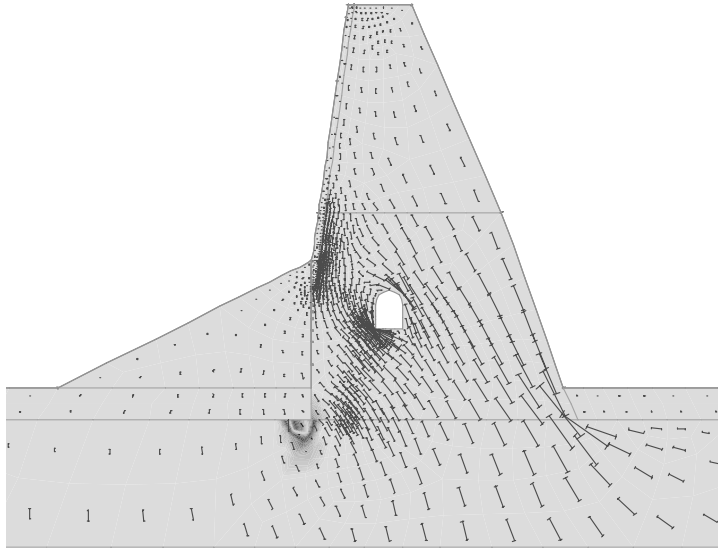
5.2 Einlesen der Lasten aus Durchströmung in TALPA

Aufbauend auf den zuvor erzeugten Ausgangs-Spannungszustand werden nun die von HYDRA ermittelten und im Lastfall 95 gespeicherten Auftriebs- und Strömungslasten über ein einfaches „load-copy“ auf die Struktur aufgebracht.

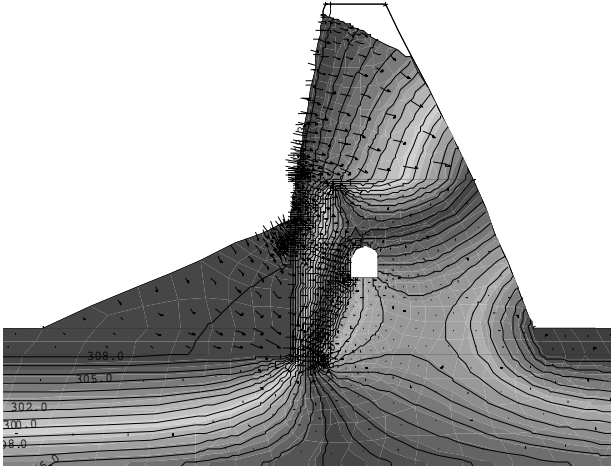
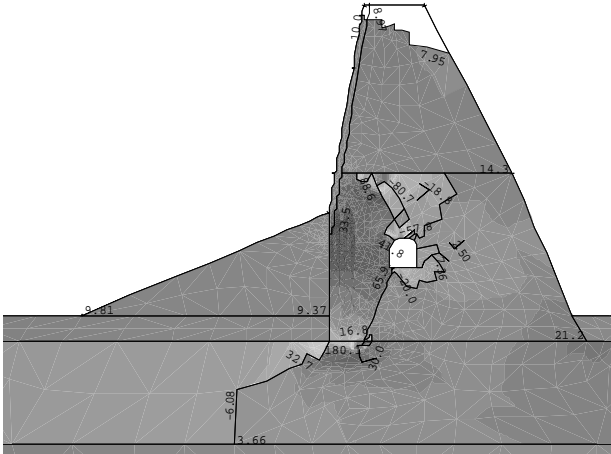
| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|-----------------|---|
| LF 4 | LF – aktuelle Lastfallnummer unter der |

| | |
|-------|--|
| | strukturmechanischen Ergebnisse dieses Lastschrittes gespeichert werden |
| LC 95 | LC – „load-copy“: Übernimmt Lasten aus dem LF 95 (in diesem Fall Strömungs- und Auftriebslasten) für den aktuellen Lastfall |

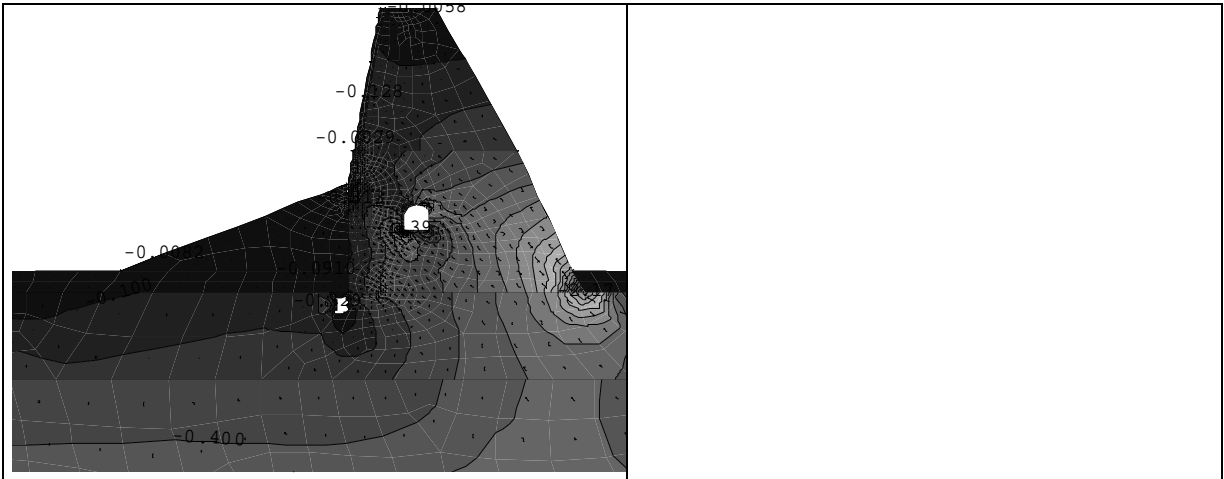
Nach einigen Iterationen stellt sich unter der zusätzlichen Strömungsbelastung ein neuer Gleichgewichtszustand ein (Konvergenz).

| Ergebnisdarstellung | Erläuterung |
|---|--|
|  | <p>Ausgangszustand – Dargestellt werden die Vektoren der ebenen Hauptdruckspannungen. Deutlich ist der Spannungsfluss um den Wartungstunnel herum zu erkennen. Unterhalb der Tunnelsohle bildet sich ein kleiner Zugspannungs-Bereich aus – die farblich hinterlegte Fläche kennzeichnet die Region, in denen eine Zugschädigung in den Mauerwerksfugen erfolgt ist.</p> |
|  | <p>Ausgangszustand + Durchströmung – Die Spannungumlagerung infolge Durchströmung bewirkt eine Entlastung des wasserseitigen Staumauerfußpunktes und eine Erhöhung der Spannungen am luftseitigen Staumauerfußpunkt. Im geklüfteten Fels unterhalb des wasserseitigen Fußpunktes sind lokale Überschreitungen der Kluft-Zugfestigkeit entstanden (farblich hinterlegt).</p> |

5.3 Grafische Ausgabe der Durchströmung

| TEDDY – Eingabe (WING) | Erläuterung |
|---|--|
| <p>HOEH TYP HF DELT 1 SCHR NEIN FILL FLAE EXTR NEIN ; UND HOEH TYP HF DELT 1 SCHR JA FILL NEIN EXTR NEIN ; UND QUAD TYP FL SCHR NEIN STYP ELEM FILL NEIN DARS DVEK</p>  | <p>Grafische Ausgabe des Freispiegels (HF) aus Durchströmung. Zur besseren Verdeutlichung sind die Höhenlinien des Potentials erst gefüllt und dann nachgezogen, die Vektoren zeigen die Richtung der Strömung</p> |
| <p>LAST ALLE EINZ VEKT FILL FLAE DARS DSCH</p>  | <p>Grafische Ausgabe der Lasten (LAST ALLE) die aus der Durchströmung resultieren</p> |
| <p>QUAD TYP S3D3 SCHR NEIN STYP KNOT FILL FLAE DARS DHOH ; UND QUAD TYP S3D3 SCHR JA STYP KNOT FILL NEIN DARS DHOH ; UND QUAD TYP S3D3 SCHR NEIN STYP ELEM FILL NEIN DARS DVEK</p> | <p>Grafische Ausgabe der größten Druckspannungen (TYP S3D3) Zur besseren Verdeutlichung sind die Höhenlinien erst gefüllt und dann nachgezogen, die Vektoren zeigen die Richtung der Spannungen</p> |

Grundbau – Standfestigkeit einer Schwergewichts-Staumauer



6 Beanspruchung aus Temperatur

Ähnlich der Grundwasserströmung lässt sich auch das Temperaturleitproblem als Potenzialproblem beschreiben und ist damit mit HYDRA lösbar. Wärmeleitmodelle können die Temperaturverteilung eines stationären Zustands oder die Wärmeausbreitung in festen Körpern berechnen.

Erforderlich für die Berechnung ist die Angabe des Materialwerts der Leitfähigkeit. Als Randbedingung werden konvektive, gemischte Randbedingungen verwendet, die das vorhandene Potenzial berücksichtigen. Bei wechselnden Randbedingungen, wie sie der Temperaturjahresgang darstellt, ist eine instationäre (zeitabhängige) Berechnung erforderlich. Diese instationäre Berechnung setzt auf einen vorher eingestellten Ausgangszustand der Temperaturverteilung auf. Die Temperaturen werden dann in einzelnen Zeitschritten berechnet und gespeichert. Aus der Differenz der Temperaturen zu unterschiedlichen Zeitpunkten lassen sich anschließend Spannungen generieren.

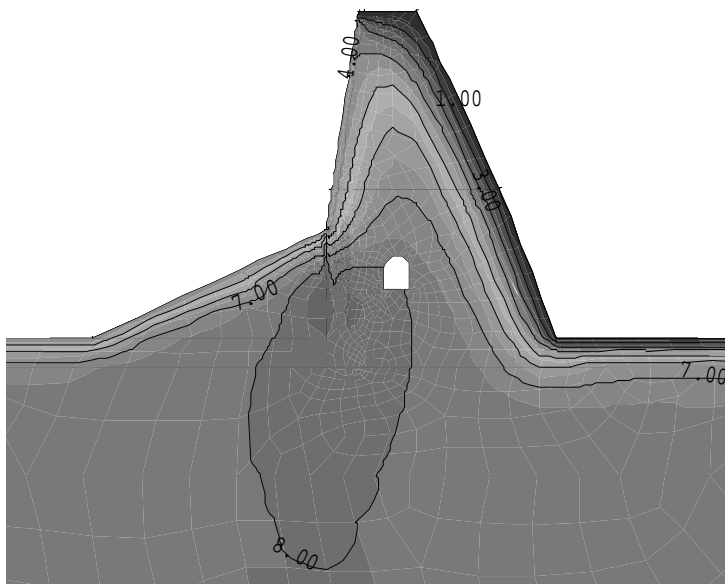
6.1 Temperaturdifferenzen im Jahresgang

6.1.1 Berechnung des Temperatúrausgangszustands mit HYDRA

| TEDDY – Eingabe (WING) | Erläuterung |
|------------------------------|---|
| SYST DIMT SEC DIMQ W | DIMQ W – Ein- und Ausgabeeinheit der Menge, entscheidet darüber, welche Art von Potenzialproblem vorliegt (W =Temperaturleitproblem) |
| MAT NR 1 KXX 3.32 S 710*2300 | KXX – Isotrope Leitfähigkeit (W/Km) S –Spezifischer Speicherkoeffizient (J/Km ³) hier nicht verwendete weitere angebbare Werte: KYY, KZZ... – Anisotrope Leitfähigkeiten NSP – Nutzbarer Hohlraumanteil |
| PLF HP 8 | PLF – Aufsetzen auf einen Ausgangszustand HP – Die Ausgangstemperatur soll überall, also in jedem Knoten, 8°C betragen. |
| STEP N 2 T 3600*24*30 | STEP – Steuerung einer instationären Berechnung N – Anzahl der Zeitschritte, hier 2, um die von der Ausgangstemperatur abweichenden Temperaturen an der Oberfläche einzustellen T – Größe (Länge) eines Zeitschritts, hier mit 30 |

| | |
|----------------------------------|--|
| | d = 3600*24*30 sec = 1 Monat gewählt |
| LF 96 | LF – Lastfallnummer unter der die Temperaturen gespeichert werden sollen. |
| RAND TYP H VAL 4 10101 DELT GLNS | RAND – Linienhafte Randbedingung TYP H – Temperatur (VAL in K) DELT GLNS – geordnete Knoten des Randes, der bei VON definiert wurde. |

6.1.2 Grafische Ausgabe des Temperatursausgangszustands

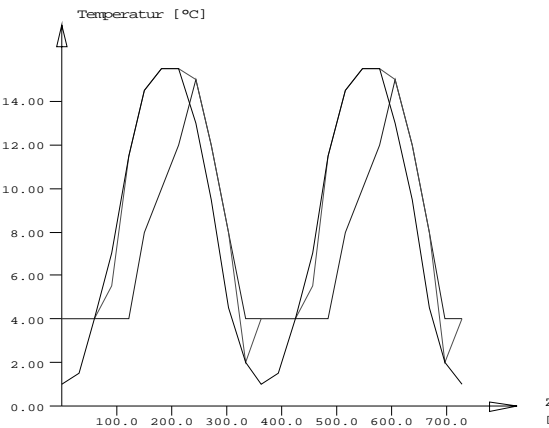
| TEDDY – Eingabe (WING) | Erläuterung |
|--|---|
| <pre> HOEH TYP TEMP VON 0 BIS 20 DELT 1 SCHR NEIN FILL FLAE ; UND HOEH TYP TEMP VON 0 BIS 20 DELT 1 SCHR 0.3 </pre>  | <p>Grafische Ausgabe der Temperatur (TEMP) des Ausgangszustands von 0°C bis 20°C in Schritten von 1°C. Zur besseren Verdeutlichung sind die Höhenlinien der Temperatur erst gefüllt und dann nachgezogen.</p> <p>Für alle künftigen Temperaturbilder empfiehlt sich die selbe Abstufung der Werte, um die Bilder visuell besser vergleichen zu können.</p> |

6.1.3 Instationäre Berechnung des Temperaturjahresgangs mit HYDRA

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|------------------------------|--|
| SYST DIMT SEC DIMQ W | DIMQ W – Ein- und Ausgabeeinheit der Menge, entscheidet darüber, welche Art von Potenzialproblem vorliegt (W =Temperatur-Leitproblem) |
| MAT NR 1 KXX 3.32 S 710*2300 | KXX – Isotrope Leitfähigkeit (W/Km) S –Spezifischer Speicherkoeffizient (J/Km ³) hier nicht verwendete weitere angebbare Werte: KYY, KZZ... – Anisotrope Leitfähigkeiten NSP – Nutzbarer Hohlraumanteil |
| ECHO STEP 1 | ECHO – Steuerung des Ausgabe- und Speicherumfangs in der Datenbasis STEP 1 – jeder gerechnete Zeitschritt soll in der Datenbasis gespeichert werden |
| PLF NR 96 T 0 | PLF – Aufsetzen auf einen Ausgangszustand oder Lastfall NR – Nummer eines gerechneten Ausgangslastfalls (hier 96) T – Zeitwert am Anfang des ersten Zeitschrittes (hier 0). Ohne diese Angabe wird der letzte im Ausgangslastfall gespeicherte Zeitwert verwendet |

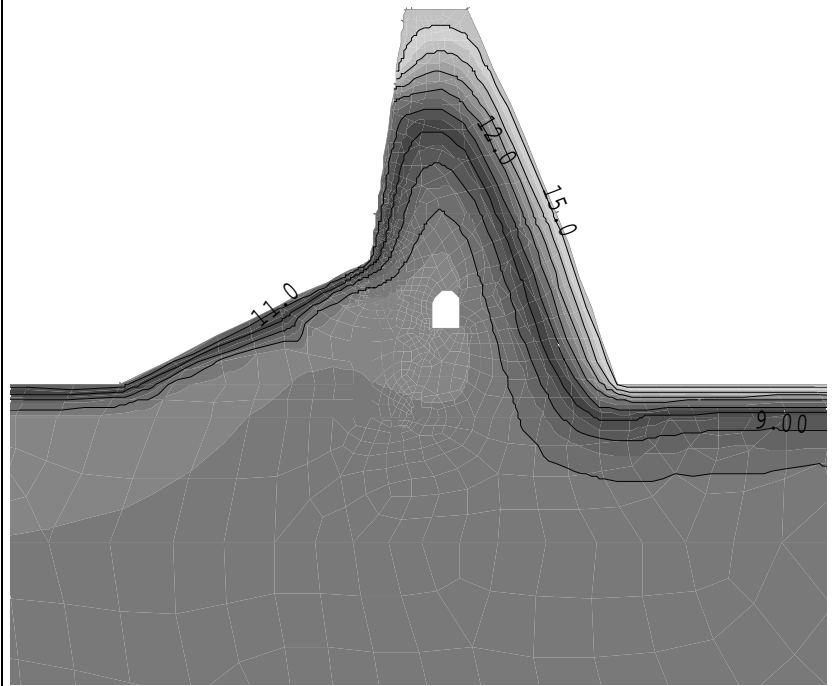
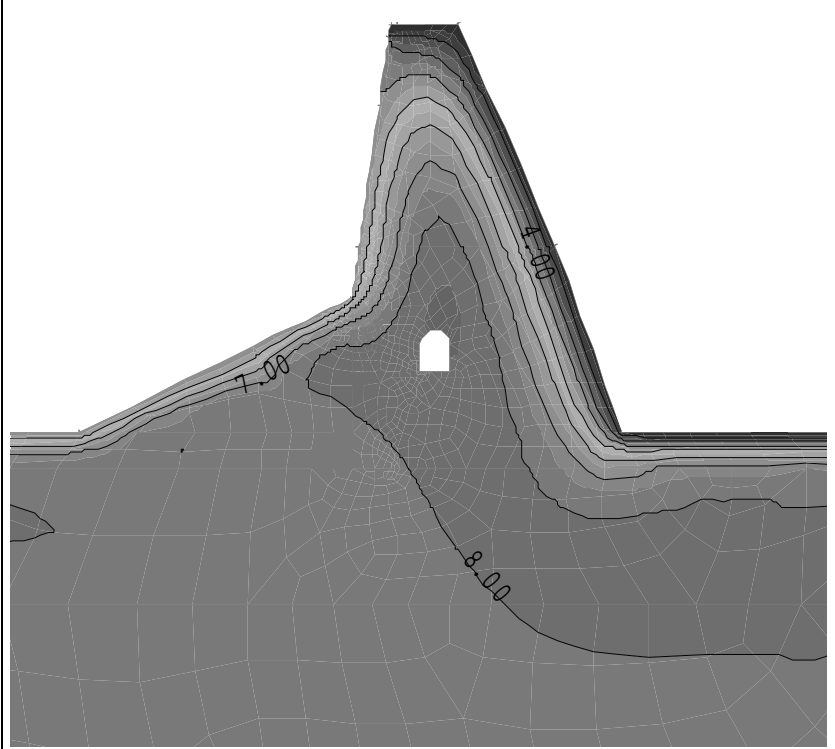
| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|--|---|
| LET#STEP (365/12)*3600*24 | LET – Definition einer Variablen (#step = Größe eines Zeitschrittes in sec, 1 Monat = (365/12)*3600*24 sec) damit die Eingabe leichter lesbar bleibt |
| STEP N 24 T #STEP | STEP – Steuerung der instationären Berechnung N – Anzahl der Zeitschritte, hier 24 , um den Jahrgang der Temperatur monatlich 2 Jahre lang zu berechnen. T – Größe (Länge) eines Zeitschritts, hier #step = 1 Monat |
| <pre> FUNK T F NR=3 BEZ='LUFTSEITE' 0*#STEP 1 5*#STEP 14.5 </pre> | <p>Im hier vorliegenden Beispiel soll sich die Temperatur jahreszeitabhängig verändern. Es liegen jeweils unterschiedliche Temperaturkurven für den Bereich unterhalb 5 m Wassertiefe, unter der Wasseroberfläche und an der Luftseite vor.</p> FUNK – Definition einer Zeitfunktion T – Zeitwert (in sec) F – Funktionswert (in K) NR – Nummer, unter der die Zeitfunktion gespeichert wird BEZ – Name der Zeitfunktion |
| <pre> RAND TYP SPEZ VAL 25 VON 999 DELT GLNS F 3 VP 1</pre> | RAND – Linienhafte Randbedingung TYP SPEZ – eine gemischte oder konvektive Randbedingung, die Temperaturerhöhung ist von der vorhandenen Temperatur abhängig, d.h. die Erdwärme wird berücksichtigt VAL – Wärmeübergangswiderstand (als Leitwert Dichte/Potenzial (K/W) pro laufendem Meter Rand), hier 25 = $1/\alpha_a = 1/0.04$ F – Nummer der Zeitfunktion (hier 3) VP - ein Faktor für die Funktionswerte der Zeitfunktion (hier 1.0) |
| <pre> HIST TYP T VON 3</pre> | <p>Mit dem Programm DYNR können für einzelne Knoten Zeitfunktionen gezeichnet werden</p> HIST – Speicherung der zeitabhängigen Funktionswerte einzelner Knoten TYP - Art des Funktionswertes, der gespeichert werden soll (T = Temperatur) VON – Nummer des Knotens, für den die Zeitkurve gespeichert wird, hier 3 |

6.1.4 Ausgabe von Zeitfunktionen an einzelnen Punkten mit DYNR

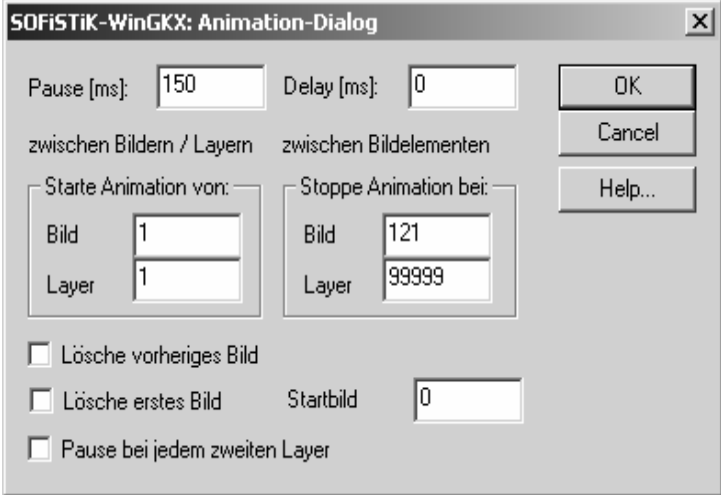
| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|--|--|
| <p>HIST LFSP 97 TYP T NR0 3 F0 4101</p>  <p>The graph displays temperature in degrees Celsius on the y-axis (ranging from 0.00 to 14.00) against time in days on the x-axis (ranging from 0 to 700.0). Two distinct cycles are shown, each with a peak around 14°C and a trough around 2°C. The first cycle occurs between approximately 100 and 400 days, and the second between 500 and 700 days.</p> | <p>HIST – Ausgabe einer Zeitfunktion LFSP – Lastfallnummer unter der die Zeitwerte gespeichert sind TYP – Art der Funktionswerte, die ausgegeben werden sollen NR0 – erste Knotennummer, für die ein Zeitwert ausgegeben werden soll, es sind pro HIST-Satz bis zu 6 Zeitkurven möglich F0 – Farbe der auszugebenden Kurve (Eingabe entspr. dem allg. Handbuch)</p> |

6.1.5 Grafische Auswertung des Jahresganges mit WING

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|---|--|
| <p>LOOP#N 24+1</p> | <p>Um die größten Temperaturdifferenzen im Jahresgang zu finden, müssen alle berechneten (monatlichen) Zeitschritte visuell kontrolliert werden.</p> <p>LOOP – Beginn einer Schleife. Die Anzahl der Durchläufe wird mit dem Wert (24+1 = Anzahl der berechneten Zeitschritte) festgelegt. #N ist die Zählvariable der Schleife, die immer mit 0 beginnt.</p> |
| <p>LF NR 97 T #N*#STEP</p> | <p>LF – Angabe des zu verwendenden Lastfalls NR – Nummer des HYDRA-Lastfalls (hier 97) T – Zeitschritt in sec (hier #N*#STEP), d.h. in jedem Schleifenumlauf wird der Zeitschritt erhöht.</p> |
| <p>FILL RGB VON 0 BIS 20 DELT 0.5</p> | <p>Temperaturabstufungen von 0°C bis 20°C in Schritten von 0.5°C (macht 40 Füllfarben)</p> |
| <p>QUAD TYP TEMP SCHR NEIN STYP KNOT FILL FLAE MITT NEIN DARS DHOH ; UND QUAD TYP TEMP SCHR NEIN STYP KNOT FILL NEIN MITT NEIN DARS DHOH</p> | <p>Zur besseren Verdeutlichung werden auf die Höhenflächen noch die Höhenlinien gezeichnet.</p> |
| <p>ENDLOOP</p> | <p>Ende der Schleife</p> |

| Ausgabe | Erläuterung |
|--|--|
|  | <p>Grafische Ausgabe der maximalen Temperaturen im Jahresgang (Sommer – Juli).</p> |
|  | <p>Grafische Ausgabe der minimalen Temperaturen im Jahresgang (Winter – Dezember).</p> |

6.1.6 Ablaufen der einzelnen Bilder als Animation mit WINGKX (Film)

| Eingabe | Erläuterung |
|--|--|
|  | <p>Die mit WING erstellten und in der PLB-Datei abgelegten Bilder können in schneller Folge hintereinander gezeigt werden (=Animation).</p> <p>Dazu ist es möglich, aus den einzelnen Bilder mittels der Export-Funktion in URSULA z.B. eine AVI-Datei zu erstellen.</p> <p>Es gibt aber auch eine direktere Methode, die die Grafiken in der PLB selbst verwendet:</p> <p>Dazu ist im Programm WINGKX die PLB-Datei zu öffnen (geht aus URSULA heraus mit CTRL-G). Dort im Menü "Animation" den Befehl "Starte Animation.." wählen.</p> <p>Die Pausen zwischen den einzelnen Bildern sind um so kleiner einzustellen, ja länger der Aufbau eines Bildes dauert. Delay ist eine Pause zwischen den einzelnen grafischen Elementen (sollte also auf 0 bleiben). Lösche vorheriges Bild sollte ausgeschaltet sein, damit kein Flackern auf dem Bildschirm entsteht.</p> <p>Hinweis: Die Animation wird um so anschaulicher, je mehr Bilder dabei verwendet werden (min. 100) . Es kann daher sinnvoll sein, einen eigenen HYDRA-Lauf des Jahresganges zu berechnen, der mehr und kürzere Zeitschritte enthält.</p> |

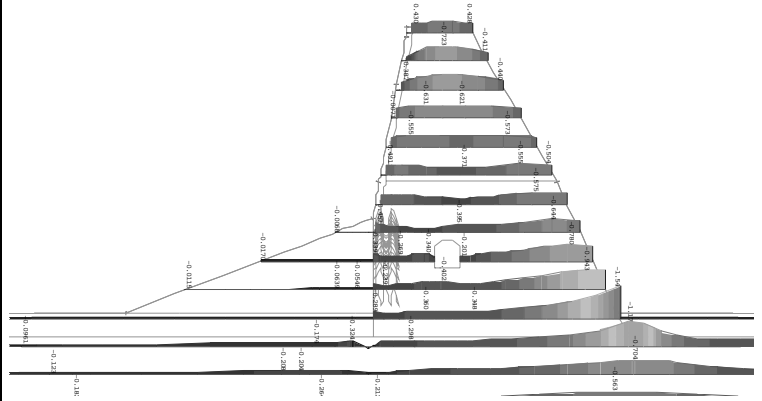
6.2 Temperaturdifferenz als Strukturlast

6.2.1 Einlesen der Temperaturen in TALPA

Für die Belastung der Struktur sind Temperaturschwankungen relevant, da Temperaturdifferenzen letztlich Dehnungs- und damit auch Spannungsänderungen hervorrufen. TALPA bietet die Möglichkeit, die mit HYDRA berechneten Temperaturverteilungen zweier Zeitpunkte einzulesen und aus deren Differenz selbständig die Belastung zu ermitteln.

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|--|--|
| LET#STEP (365/12)*3600*24 | LET – Definition einer Variablen (#step = Größe eines Zeitschrittes in sec, 1 Monat = (365/12)*3600*24 sec) damit die Eingabe leichter lesbar bleibt |
| PLFT LF1 97 T1 7*#STEP LF2 97 T2 12*#STEP | Offensichtlich (d.h. nach visueller Auswertung des Jahresganges) bestehen die maximalen Temperaturunterschiede zwischen Sommer (Juli) und Winter (Dezember). PLFT – Einlesen der Temperaturen aus HYDRA Für die Berechnung der Differenzspannungen aus 2 Temperaturangaben müssen 2 Zeitschritte, die auch in verschiedenen Lastfällen liegen können, angegeben werden. Je nach dem in welcher Reihenfolge die Temperaturzeitschritte vorgegeben werden, entstehen Zug- oder Druckspannungen. LF1 – Erster Lastfall (hier 97) T1 – Erster Zeitschritt (hier 7*#STEP = Juli) LF2 – Zweiter Lastfall (hier 97 , wie beim ersten) T2 – Zweiter Zeitschritt (hier 12*#STEP = Dezember) |

6.2.2 Visualisierung der Spannungen nach Temperatur-Jahresgang mit WING

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|---|--|
| <pre> LOOP#N 16 MOVE X -40 309.26-0.6-#N*3 DTYP QSCH DRAW X +60 309.26-0.6-#N*3 DTYP QSCH ENDLOOP QUAD TYP S3D3 UNIT 3 SCHR 0.1 STYP KNOT FILL SENK DARS DCUT MITT NEIN </pre>  | <p>Die Auswertung der Spannungen kann auch an (horizontalen) Schnitten durch das System erfolgen.</p> <p>Hierzu werden mit den MOVE-DRAW-Befehlen zunächst 16 Schnittlinien erzeugt.</p> <p>Durch die Angabe DARS DCUT wird die Ausgabe an diesen Schnitten angefordert.</p> |

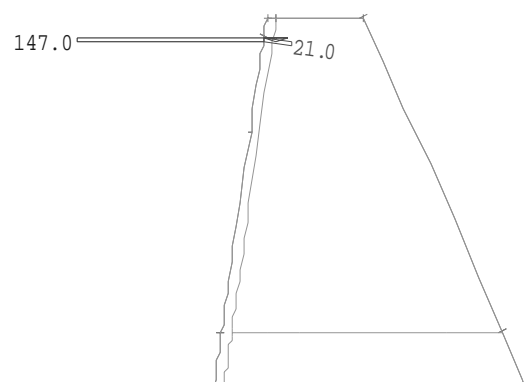
7 Eisdruck

7.1 Ermittlung des Lastbildes und Eingabe mit SOFILOAD

Nach DIN 19700 Teil 11, ist für die Beanspruchung von Staumauern der Eisdruck zu berücksichtigen. Im Binnenland ist das Eis mit einer Stärke von 30 cm anzunehmen. Neben einer horizontalen Komponente ist bei geneigten Staumauern auch ein vertikaler Anteil in Höhe von 10% der Horizontallast zu berechnen.

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|--|--|
| <pre> LINE REF GLN TYP PXX P1 .. X1 .. Y1 .. LINE REF GLN TYP PYY P1 .. X1 .. Y1 .. </pre> | <p>Die Lasten werden, in ihre globalen Komponenten zerlegt und als Linienlasten auf die Struktur referenziert, aufgebracht.</p> <p>LINE – Definition einer Linienlast REF GLN – Referenz der Last auf Geometrielinien TYP PXX – Typ und Richtung der Last P1,P2 – Lastwerte X1,Y1,X2,Y2 – Koordinaten der Lastlinie</p> |

7.2 Kontrolle des Lastbildes mit WING

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|---|--|
| <p>LAST GTYP EING</p>  | <p>Mit dieser Eingabe werden die Lasten so gezeigt, wie sie mit SOFILOAD definiert wurden.</p> |

7.3 Berechnung mit TALPA

Die ermittelten Lasten aus Eisdruck sollen zusätzlich zu den bisher betrachteten Lastfällen ins System eingetragen werden. Dazu wird wie bisher auch auf den vorangehenden Zustand (hier LF 5, Zustand nach Temperatureinwirkung) als Primärzustand aufgesetzt. Zusätzlich zu den bislang im System berücksichtigten Belastungen (Eigengewicht, Strömungslast) werden nun auch die Lasten aus Eisdruck mit dem „load-copy“ Befehl übernommen. Für die Temperaturbelastung gilt: *Die Beanspruchung aus Temperatur- wie auch aus anderen Dehnungslasten bleibt, nachdem sie einmal ins System eingetragen ist, erhalten – im Unterschied zu Beanspruchung aus externer Belastung, wo sich bei Wegfall der Belastung zunächst ein Spannungs-Ungleichgewicht einstellt.* Demzufolge wird die Temperaturlast hier nicht erneut spezifiziert, sie würde doppelt wirken!

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|-------------------------|---|
| LF 6 | LF – aktuelle Lastfallnummer unter der strukturmechanischen Ergebnisse dieses Lastschrittes gespeichert werden |
| LC 95 LC 91 LC 92 | LC – „load-copy“: Aktivierung der Lasten aus dem LF 95 (Strömungs- und Auftriebslasten), LF 91 (horizontaler Eisdruck) und LF92 (vertikaler Eisdruck) für den aktuellen Lastfall |

8 Erdbebenbelastung

8.1 Definition des Antwortspektrums

Die Erfassung der Belastung aus Erdbeben erfolgt nach dem Antwortspektren-Verfahren. Dazu wird zunächst ein Antwortspektrum mit SOFILOAD und einer gewählten Grundbeschleunigung $a = 0.3 \text{ m/s}^2$ definiert, dass später von DYNA verwendet wird.

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|------------------------------|--|
| LF 110 BEZ 'Antwortspektrum' | LF – Der Lastfall 110 wird für das Antwortspektrum. |
| RESP RDIN | RESP – Das Antwortspektrum nach DIN 4149 wird gewählt (normierte einheitslose Ordinate vs. Frequenz). |
| ACCE NR 0 AX 0.3 | ACCE – Die Grundbeschleunigung wird mit 0.3 m/s^2 in horizontaler x-Richtung gewählt und dient zur Skalierung des normierten Antwortspektrums. NR 0 bedeutet, dass alle Knoten beschleunigt werden. |

8.2 Eigenformen der Struktur

Dazu werden zunächst mittels modaler Analyse in DYNA einige Eigenformen der Struktur berechnet, in diesem Beispiel auf die ersten 3 Eigenformen beschränkt. Die Masse des eingestauten Wasserkörpers wird im Beispiel vernachlässigt, könnte aber einfach über die DYNA-interne automatische Umwandlung statischer Ersatzlasten in äquivalente Massen erfolgen.

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|--------------------|---|
| EIGE NEIG 3 LF 101 | EIGE – Eine modale Analyse zur Berechnung der ersten 3 Eigenformen wird angefordert. Die Ergebnisse werden in den Lastfällen 101ff abgelegt. |

Die erste Eigenform repräsentiert eine „Kragarmschwingung“, die im betrachteten Beispiel für maßgebend erachtet wird. Für diese erste Eigenfrequenz erfolgt nun die Ermittlung des Response-Faktors aus dem Antwortspektrum. Dies kann mit DYNA wie folgt geschehen.

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|------------------|---|
| EIGE NEIG 1 REST | EIGE – Verwenden der ersten Eigenform. REST heißt, die bereits gerechnete Eigenform soll verwendet werden. |
| LF NR 110 | LF – Der Lastfall 110 mit dem bereits definierten Antwortspektrum wird selektiert. |

| Ergebnis-Ausgabe | Erläuterung |
|---|---|
| <pre> : Modaler Response Anteile der Lastfunktionen sind rein stationär ohne Einschwinganteile Anteile aller Funktionen werden absolut addiert Fkt. Mode Response Phase Mode Response Phase 110 1 -5.540E-02 : </pre> | Der Response-Faktor für die betrachtete Eigenform wird der Ergebnisdatei entnommen. |

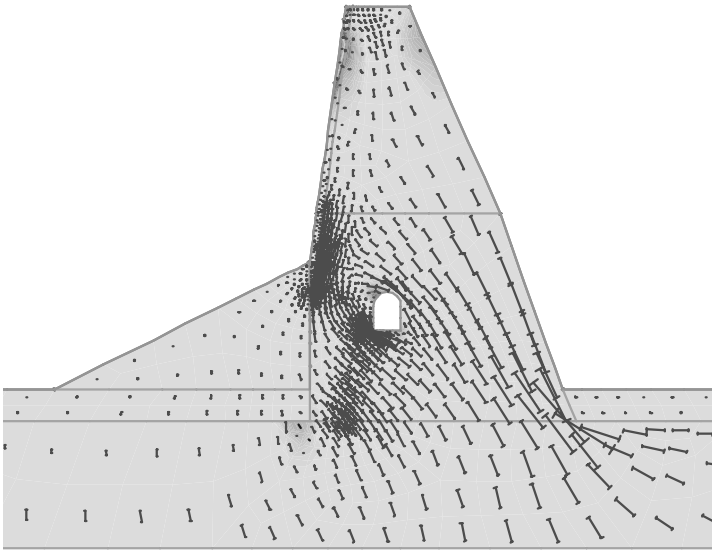
8.3 Von Eigenform und Response-Faktor zur Strukturlast

Um die (nichtlineare) strukturmechanische Beanspruchung aus der Erdbebenanregung zu erfassen, wird ein entsprechendes Lastbild benötigt. Für die Eigenformen sind aber in der Regel nur (linear elastische) Spannungszustände verfügbar. Dieses Problem wird in TALPA einfach gelöst. Mit einer einfachen Eingabeanweisung können zu beliebigen Spannungszuständen die korrespondierenden Knotenlastbilder berechnet und in der Datenbank abgespeichert werden.

| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|--|---|
| PLF NR 101 TYP S2L | PLF – NR selektiert den zu importierenden Lastfall, hier den Lastfall der 1. Eigenform. TYP S2L („stress to load“) bewirkt die Berechnung der zum importierten Spannungszustand äquivalenten Knotenlasten. |
| LF NR 99 BEZ 'Lasten aus 1. Eigenform' | LF – NR gibt die Nummer an, unter der die berechneten Knotenlasten abgespeichert werden sollen. |
| STEU SOLV 0 | Optional: Unterdrückt die Lösung des Gleichungssystems. Bricht die Berechnung nach Erzeugung der Lasten ab. |

In einem letzten Schritt wird nun das so erzeugte Lastbild als zusätzliche, mit dem Response-Faktor skalierte, Belastung auf das System aufgebracht und die Strukturmechanische Berechnung angestoßen. Das Vorzeichen des Responsefaktors entscheidet dabei über die Richtung der Last und sollte ungünstig gewählt werden.

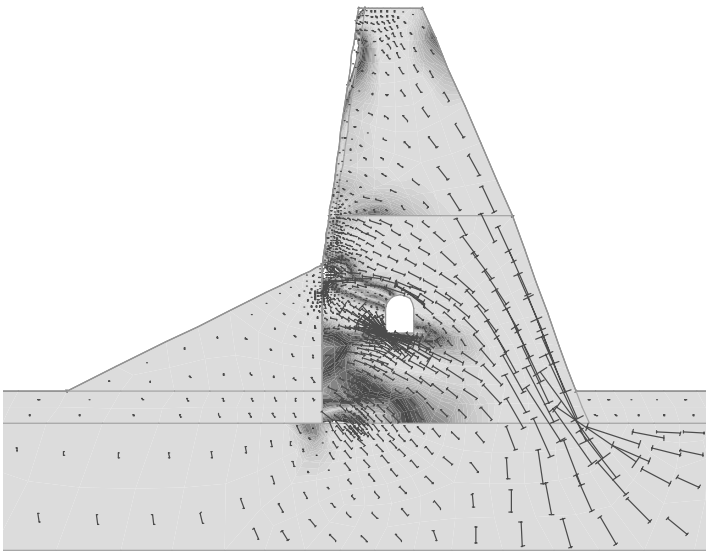
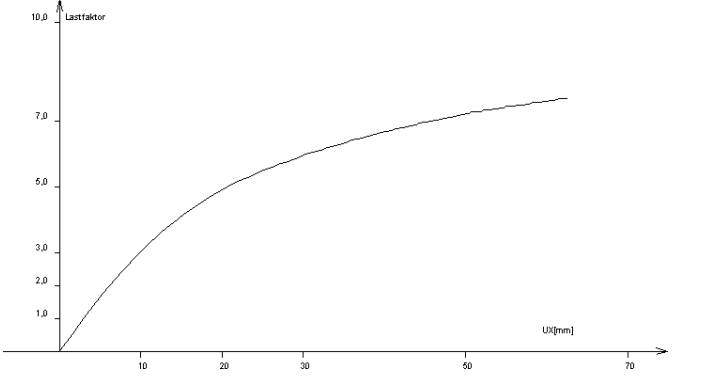
| TEDDY - Eingabe | Erläuterung |
|-------------------------|---|
| LF 7 | LF – aktuelle Lastfallnummer unter der strukturmechanischen Ergebnisse dieses Lastschrittes gespeichert werden |
| LC 99 FAKT 0.05540 : | LC – „load-copy“: Aktivierung der Lasten aus der 1. Eigenform, skaliert mit dem Response-Faktor |

| Ergebnisdarstellung | Erläuterung |
|--|---|
|  | <p>Nach Erdbebenbelastung – Deutlich erkennbar hat die Riss-Schädigung zugenommen, die Staumauer ist aber noch nicht in ihrer Standsicherheit gefährdet.</p> |

Um die Sicherheits-Reserven der Struktur zu abschätzen zu können, ist es sinnvoll, eine inkrementelle Lasterhöhung oder Festigkeitsreduktion (oder eine Kombination von beidem) durchzuführen. In diesem Fall erfolgt exemplarisch eine Steigerung der Erdbebenlast mit automatischer Inkrementwahl durch TALPA.

| TEDDY – Eingabe | Erläuterung |
|---|--|
| <pre> STEU STEP AUTO FMAX 0.05 FMIN 20EMIN 1/80 SPEI 1 </pre> | <p>STEU STEP AUTO– automatische Inkrementierung der Last bis zu einem maximalen Lastfaktor FMIN = 20. Der Lastfaktor des ersten Schritts ist FMAX = 0.05. Die Größe der Lastinkremente wird</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>automatisch bestimmt. Wird für ein Lastinkrement keine Konvergenz erzielt, wird das Lastinkrement reduziert und ein erneuter Versuch ausgehend vom letzten erreichten Gleichgewichtszustand gestartet. Die Berechnung endet, wenn entweder der maximale Lastfaktor erreicht wurde oder nach wiederholter Inkrementreduktion die minimale Inkrementgröße $EMIN = 1/80$ unterschritten wird. $SPEI = 1$ bewirkt das Abspeichern sämtlicher konvergenter Lastschritte (der letzte Lastschritt wird immer abgespeichert).</p> |
| <p>LF 11 BEZ '+ Erdbeben-Laststeigerung' :</p> | <p>LF – Die Berechnungsergebnisse der Lastschritte werden im Lastfall 11ff. abgelegt</p> |

| Ergebnisdarstellung | Erläuterung |
|---|--|
|  | <p>Schädigung bei 7-facher Erdbebenlast – Unter 7-facher Erdbebenlast weist die Struktur ausgeprägte Schädigungseffekte auf. Zu diesem Zeitpunkt haben sich lokale Schädigungsbereiche bereits zu bandartigen Regionen verbunden, die den Staukörper deutlich schwächen.</p> |
|  | <p>Horizontale Verschiebung der Staumauer-Krone – Aus der Erdbeben-Lastfaktor – Verschiebungskurve für den Staumauer-Kopfpunkt ist deutlich erkennbar wie das Bauwerk mit zunehmender Last aufgrund der fortschreitenden Schädigung progressiv weicher reagiert und sich dem Versagenszustand nähert.</p> |