



**Institut für Strömungsmechanik**  
und Elektronisches Rechnen im Bauwesen  
**Universität Hannover**  
Prof. Dr.-Ing. W. Zielke



# ROCKFLOW

## Tutorial D

Version 0.2.1

für  
**RockFlow 3.8.68**

Programmentwickler der verwendeten Modelle:


René Kaiser	Strömungsmodell „0“, Adaption
Abderrahmane Habbar	Reaktives Transportmodell „10097“, „10095“
Olaf Kolditz	Wärmetransportmodell „10093“
Carsten Thorenz	Mehrphasenströmungsmodell „10699“
Martin Kohlmeier	THM <sub>plus</sub> „18460“

Bearbeiter des Tutorials: A. Ahmari

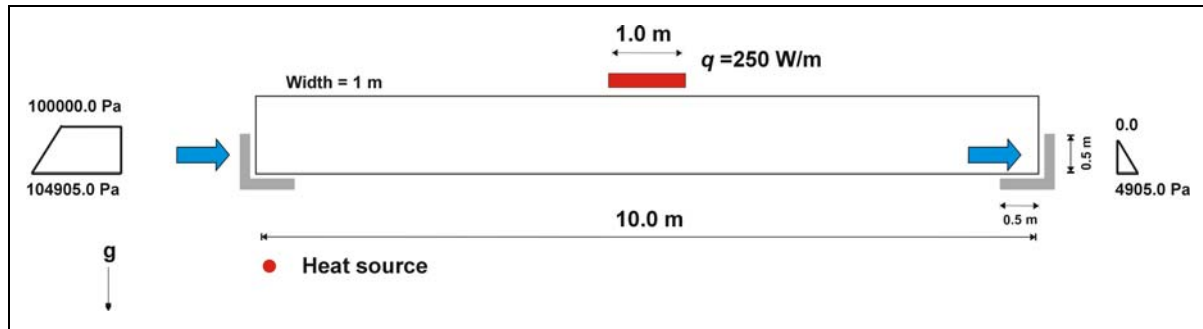
Hannover, 01. März 2006

## Tutorial D: Thermisch, hydraulisch und mechanisch gekoppelte Prozesse

Tutorial	Name	Voraussetzung	Inhalt
D1	<b>BEAM THM 2D</b> (THM <sub>plus</sub> )	Tutorial A Tutorial B	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Steuerung thermischer, hydraulischer und mechanischer Prozesse</li><li>▪ Einphasige Strömung mit Wärmetransport im deformierbaren porösen Medium – 2D</li></ul>
D2	<b>BEAM THM 3D</b> (THM <sub>plus</sub> )	Tutorial A Tutorial B	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Steuerung thermischer, hydraulischer und mechanischer Prozesse</li><li>▪ Einphasige Strömung mit Wärmetransport im deformierbaren porösen Medium – 3D</li></ul>

RockFlow Tutorial <b>D1</b>	<h1>BEAM THM-2D</h1> <p>(Thermo-Hydro-Mechanics)</p>	single phase flow
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modellierung gekoppelter Prozesse</li> <li>▪ Vergleich der Simulationsergebnisse zwischen den unterschiedlich gekoppelten Prozessen</li> </ul>	
<h1>#</h1>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ THM<sub>plus</sub> - Modell „18460“</li> <li>▪ Keywords:           <ul style="list-style-type: none"> <li>#PROJECT</li> <li>#MODEL</li> <li>#PROCESS_SOLID_DEFORMATION, #PROCESS_HEAT_TRANSPORT</li> <li>#PROCESS_FLUID_FLOW</li> <li>#TIME, #OUTPUT, #NUMERICS</li> <li>#LINEAR_SOLVER_PROPERTIES_DISPLACEMENT</li> <li>#LINEAR_SOLVER_PROPERTIES_TEMPERATURE</li> <li>#INITIAL_CONDITIONS_PRESSURE</li> <li>#INITIAL_CONDITIONS_TEMPERATURE</li> <li>#BOUNDARY_CONDITIONS_PRESSURE</li> <li>#BOUNDARY_CONDITIONS_TEMPERATURE</li> <li>#BOUNDARY_CONDITIONS_DISPLACEMENT_X</li> <li>#BOUNDARY_CONDITIONS_DISPLACEMENT_Z</li> <li>#SOURCE_HEAT_PHASE</li> <li>#REFERENCE_CONDITIONS, #FLUID_PROPERTIES</li> <li>#SOLID_PROPERTIES, #SOIL_PROPERTIES</li> <li>#CURVES</li> <li>#STOP</li> </ul> </li> </ul>	
<p>Betrachtet wird ein homogener, mit Wasser gesättigter poröser Balken, der durch zwei Auflager gehalten und durch sein Eigengewicht belastet wird. Wegen des Wasserdruckunterschiedes zwischen der linken und rechten Seite des Balkens fließt Wasser vom linken zum rechten Auflager (Abbildung 1). Zusätzlich befindet sich in dem mittleren Bereich auf dem Balken eine Wärmequelle von <math>q = 250 \text{ W/m}</math>. Unter diesen Randbedingungen soll mit dem zweidimensionalen Modell eine thermisch-hydraulisch-mechanisch (THM) gekoppelte Berechnung durchgeführt werden.</p>		

**D1 - BEAM THM-2D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 2D)



**Abbildung 1: Systemskizze THM-Modell 2D**

Tabelle1: Daten zu THM-Modell 2D		
Parameter	Value	Unit
porosity, $n$	0.5	-
permeability, $k$	$1.0 \cdot 10^{-13}$	$m^2$
dispersion length longitudinal	0.5	m
dispersion length transversal	0.0	m
density water, $\rho_f$	1000	$kg/m^3$
viscosity water, $\mu$	0.001	Pa·s
Young's modulus, $E$	1000	GPa
Poisson's ratio, $\nu$	0.2	-
solid density, $\rho_s$	7800	$kg/m^3$
gravity, $g$	9.81	$m/s^2$

Vorgehensweise:

Es werden Simulationen durchgeführt, bei denen die Prozesse Wärmetransport (T) und Strukturmechanik (M) sowie Einphasenströmung (H) Berücksichtigung finden.

Um die auftretenden Kopplungen zu verdeutlichen, wird die Zahl der beteiligten Prozesse variiert.

Weiterhin wird der Verfeinerungsgrad des Modells erhöht, um dessen Wirkung auf die Berechnungsergebnisse (hier: Spannungs- und Temperaturverlauf) beobachten zu können.

# Eingabedateien

## RFI-Datei

BEAM\_THM\_2d.rfi

BEAM\_TM\_2d.rfi

BEAM\_TH\_2d.rfi

Die Modellierung erfolgt zweidimensional. Der Balken wird durch 40 2D-Viereckselemente mit insgesamt 63 Knoten in zwei Reihen diskretisiert (Abbildung 2)

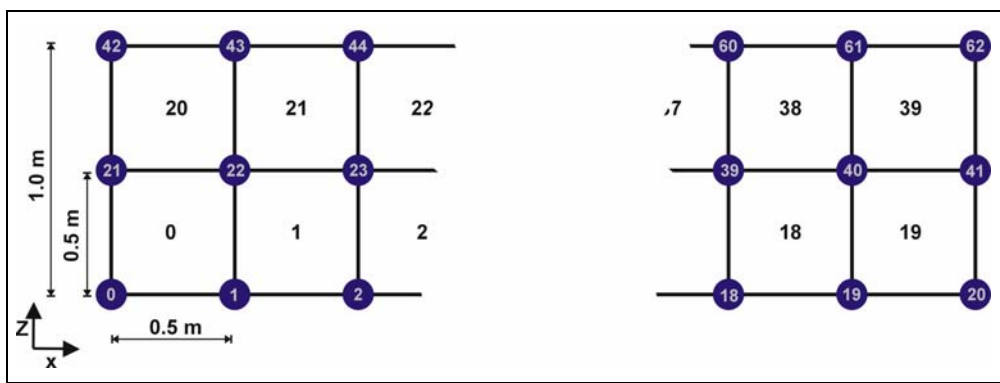


Abbildung 2: Ausgangsnetz (THM-Modell-2D)

## RFD-Datei

BEAM\_THM\_2d.rfd

BEAM\_TM\_2d.rfd

BEAM\_TH\_2d.rfd

In diesem Abschnitt werden nach wie vor nur die Schlüsselwörter erläutert, die von vorhergehenden Beispielen abweichen oder zum Verständnis des Beispiels besonders wichtig sind.

**#Model**

```

#MODEL
1           ; simulation flag
18460      ; model identifier
0           ; flow model flag
0           ; convection model flag
0           ; chemical model flag
0           ; transport phase of multiphase model
0           ; simulation optimizer flag
1           ; material groups
1           ; phases
0           ; components
0           ; adaptive mesh refinement flag
0           ; chain_reaction_model
0           ; heat_reaction_model
0           ; saturation_calculation_method
0           ; mobile immobile model flag

```

Unter dem Keyword „#MODEL“ werden, wie vorher beschrieben, Angaben zu dem verwendeten Modell festgelegt. Mit dem „**model identifier**“ wird das Berechnungsmodell ausgewählt. Bei dem hier gewählten Modell „18460“ wird die Kopplung zwischen unterschiedlichen Prozessen (thermisch – hydraulisch – mechanisch) ermöglicht. Die zu berücksichtigenden Prozesse werden durch die gesetzten „process - Keywords“ bestimmt.

**#PROCESS *process\_name***

```

#PROCESS_SOLID_DEFORMATION
#PROCESS_HEAT_TRANSPORT
#PROCESS_FLUID_FLOW           ; fluid flow
$ACTIVATION 0                 ; initial conditions are set (hydrostatic p[t=0])
                               ; process is deactivated

```

<u>Process_name</u>	<u>Acronym</u>	<u>Process</u>
<b>HEAT_TRANSPORT</b>	<b>T</b>	<b>Thermal</b>
<b>FLUID_FLOW</b>	<b>H</b>	<b>Hydraulic</b>
<b>SOLID_DEFORMATION</b>	<b>M</b>	<b>Mechanical</b>

Mit dem Keyword „#PROCESS *process\_name*“ werden die beteiligten Prozesse festgelegt. Wird ein Prozess angegeben, so wird dessen Datenstruktur aufgebaut und die zugehörigen Simulationsergebnisse in der Ausgabedatei (\*.rfo) angegeben.

Der hydraulische Prozess wurde durch das Schlüsselwort „\$ACTIVATION 0“ deaktiviert. Durch diese Deaktivierung des Prozessablaufes bleibt der durch „#INITIAL\_CONDITIONS\_PRESSURE“ vorgegebene Anfangszustand erhalten.

**D1 - BEAM THM-2D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 2D)**#PROCESS\_SOLID\_DEFORMATION**

Prozess: Festkörperdeformation (hier: Belastung durch Eigengewicht, Temperatur und Wasserdruck)

**#PROCESS\_HEAT\_TRANSPORT**

Prozess: Wärmetransport (hier: Advektiver und diffusiver Transport)

**#PROCESS\_FLUID\_FLOW**

Prozess: Strömung (hier: Durchfluss vom Wasser von links nach rechts)

**#TIME**

```
#TIME
0.0           ; final simulation time
0             ; maximum time step number
0             ; time step control
28  86400.0   ; time step number, time step length
8   604800.0  ; time step number, time step length
```

Die zeitliche Diskretisierung erfolgt in 36 Zeitschritten mit einer Länge von 24 h bei den ersten 28 Zeitschritten und 7 Tage bei den letzten 8 Schritten. Es ergibt sich eine gesamte Simulationszeit von 12 Wochen.

**#OUTPUT**

```
#OUTPUT
0           ; files
1           ; geometry
1           ; initial condition
0           ; format
1           ; numbering
2           ; type
1           ; parameters
```

Unter dem Keyword „#OUTPUT“ wird die Ausgabe in der RFO-Datei spezifiziert. Bei „**geometry**“ „1“ werden Geometrieinformationen zu jedem Zeitpunkt ergänzt.

Durch „**initial condition**“ „1“ wird der Anfangszustand ebenfalls ausgegeben. Mittels „**type**“ „2“ erfolgt eine Ausgabe der Berechnungsergebnisse zu jedem Vielfachen des unter „**parameters**“ angegebenen Zeitschrittes. Es werden somit alle Berechnungsschritte ausgegeben.

```
#LINEAR_SOLVER_PROPERTIES_DISPLACEMENT
```

```
#LINEAR_SOLVER_PROPERTIES_TEMPERATURE
```

```
#LINEAR_SOLVER_PROPERTIES_PRESSURE
```

```
#LINEAR_SOLVER_PROPERTIES_DISPLACEMENT
2                ; method
0                ; norm
101              ; preconditioning
1000000          ; maximum iterations
0                ; repeating
0                ; criterion
1.0e-010         ; absolute error
0                ; kind
4                ; matrix storage technique

#LINEAR_SOLVER_PROPERTIES_TEMPERATURE
2                ; method
0                ; norm
101              ; preconditioning
1000000          ; maximum iterations
0                ; repeating
0                ; criterion
1.0e-010         ; absolute error
0                ; kind
4                ; matrix storage technique

#LINEAR_SOLVER_PROPERTIES_PRESSURE
2                ; method
0                ; norm
101              ; preconditioning
1000000          ; maximum iterations
0                ; repeating
0                ; criterion
1.0e-010         ; absolute error
0                ; kind
4                ; matrix storage technique
```

```
#INITIAL_CONDITIONS_PRESSURE
```

```
#INITIAL_CONDITIONS_TEMPERATURE
```

```
#INITIAL_CONDITIONS_PRESSURE
5                ; type
0                ; mode
1.0              ; z
0.0              ; p[z]
-9810.0          ; dp/dz
#INITIAL_CONDITIONS_TEMPERATURE
0                ; type
0                ; mode
20.0             ; value
```

Unter dem Schlüsselwort „#INITIAL\_CONDITIONS\_PRESSURE“ wird der Anfangsdruckzustand definiert. In diesem Beispiel soll ein hydrostatischer Anfangsdruck herrschen.

Dazu wird der „type“ „5“ gewählt und an der Stelle  $z = 1\text{m}$  ein Druck vom  $p[z] = 0.0$  und eine hydraulische Druckänderung in z-Richtung von  $dp/dz = -9810$  gesetzt. Für Anfangstemperaturzustand wird unter „#INITIAL\_CONDITIONS\_TEMPERATURE“ und durch „type“ „0“ allen Knoten der gleiche Wert „value“ zugeordnet.



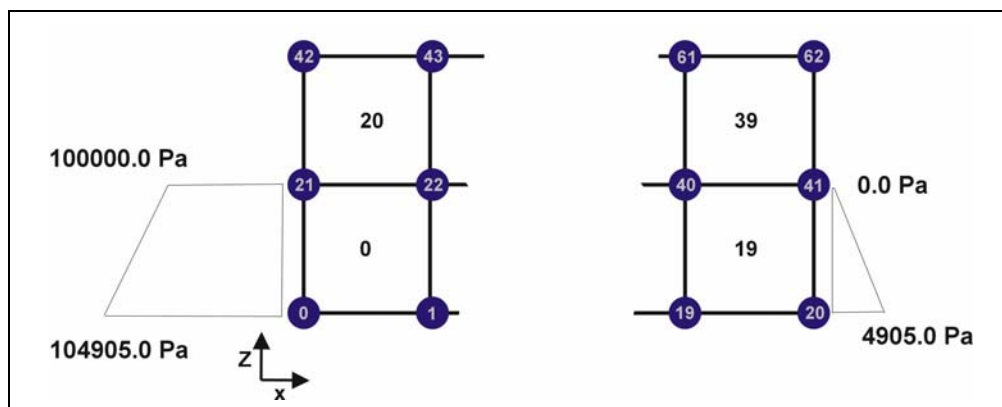
**D1 - BEAM THM-2D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 2D)**#BOUNDARY\_CONDITIONS\_PRESSURE**

```

#BOUNDARY_CONDITIONS_PRESSURE
; left (x=0.0)
2                                ; type
0                                ; mode
0                                ; curve
0.0 0.0 0.0                      ; x0,y0,z0
0.0 0.0 0.5                      ; x1,y1,z1
1.0e-003                        ; epsilon
104905.0 100000.0                ; value0,value1
; right (x=10.0)
2                                ; type
0                                ; mode
0                                ; curve
10.0 0.0 0.0                     ; x0,y0,z0
10.0 0.0 0.5                     ; x1,y1,z1
1.0e-003                        ; epsilon
4905.0 0.0                       ; value0, value1

```

Die Druckrandbedingung von 100 kPa an der linken und rechten Seite des betrachteten Balkens (siehe Abbildung 3) wird mit dem Keyword „#BOUNDARY\_CONDITIONS\_PRESSURE“ definiert. Mit dem „type“ „2“ erfolgt eine lineare Zuweisung (hier Druck) entlang einer Linie zwischen zwei Knoten. So wird allen Knoten, die auf dieser Linie liegen, ein entsprechender Wert zugeordnet. Die Zuordnung des Druckes an den Anfangs- und Endknoten erfolgt durch „value0“ und „value1“.



**Abbildung 3: Zuweisung von Druckrandbedingungen**

Die hier zugeordneten Druckrandbedingungen verursachen ein permanentes Druckgefälle von links nach rechts in Höhe von 10000 Pa/m.

**D1 - BEAM THM-2D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 2D)**#BOUNDARY\_CONDITIONS\_TEMPERATURE**

```

#BOUNDARY_CONDITIONS_TEMPERATURE
2                                ; type
0                                ; mode
0                                ; curve
0.0 0.0 0.0                      ; x0,y0,z0
0.0 0.0 0.5                      ; x1,y1,z1
1.0e-003                          ; epsilon
20.0 20.0                          ; value0, value1
;
2                                ; type
0                                ; mode
0                                ; curve
0.0 0.0 0.0                      ; x0,y0,z0
0.5 0.0 0.0                      ; x1,y1,z1
1.0e-003                          ; epsilon
20.0 20.0                          ; value0, value1
;
2                                ; type
0                                ; mode
0                                ; curve
9.5 0.0 0.0                      ; x0,y0,z0
10.0 0.0 0.0                     ; x1,y1,z1
1.0e-003                          ; epsilon
20.0 20.0                          ; value0, value1
;
2                                ; type
0                                ; mode
0                                ; curve
10.0 0.0 0.0                     ; x0,y0,z0
10.0 0.0 0.5                     ; x1,y1,z1
1.0e-003                          ; epsilon
20.0 20.0                          ; value0, value1

```

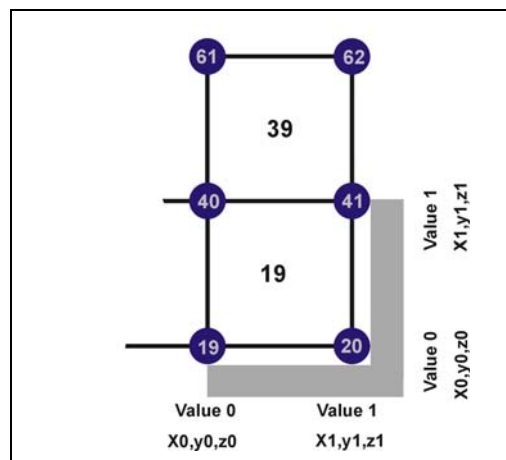


Abbildung 4: Zuweisung von Temperaturrandbedingungen

Die Temperaturrandbedingung wird mit dem Keyword „#BOUNDARY\_CONDITIONS\_TEMPERATUR“ definiert. Hierzu benötigt man die Angaben der Koordinaten der Knoten und der zugehörigen Werte (Abbildung 4, vgl. auch #BOUNDARY\_CONDITIONS\_PRESSURE). Die Koordinaten der Knoten ergeben sich aus Abbildung 1 und Abbildung 2. In diesem Beispiel wird den drei Punkten - Knoten 19, 20, 41 der gleiche Wert zugeordnet („value0“ = „value1“ = 20.0). Den Knoten an allen vier Auflagerrändern wird also hier eine Temperatur von 20° C zugewiesen.

**D1 - BEAM THM-2D (Coupled Processes with Single Phase Flow - 2D)****#BOUNDARY\_CONDITIONS\_DISPLACEMENT\_X****#BOUNDARY\_CONDITIONS\_DISPLACEMENT\_Z**

```

#BOUNDARY_CONDITIONS_DISPLACEMENT_X
2                ; type
0                ; mode
0                ; curve
0.0 0.0 0.0     ; x0,y0,z0
0.0 0.0 0.5     ; x1,y1,z1
1.0e-003        ; epsilon
0.0 0.0         ; value0,value1
;
2                ; type
0                ; mode
0                ; curve
10.0 0.0 0.0    ; x0,y0,z0
10.0 0.0 0.5    ; x1,y1,z1
1.0e-003        ; epsilon
0.0 0.0         ; value0,value1
;
#BOUNDARY_CONDITIONS_DISPLACEMENT_Z
2                ; type
0                ; mode
0                ; curve
0.0 0.0 0.0     ; x0,y0,z0
0.5 0.0 0.0     ; x1,y1,z1
1.0e-003        ; epsilon
0.0 0.0         ; value0, value1
;
2                ; type
0                ; mode
0                ; curve
9.5 0.0 0.0     ; x0,y0,z0
10.0 0.0 0.0    ; x1,y1,z1
1.0e-003        ; epsilon
0.0 0.0         ; value0, value1

```

Um die Verschiebungsrandbedingung im Bereich der Auflager in die x- bzw. z-Richtung zu definieren, wird das Keyword „#BOUNDARY\_CONDITIONS\_DISPLACEMENT\_*direction*“ verwendet. Bei dieser Randbedingung handelt es sich um ein unverschiebliches Auflager (siehe Abbildung 4).

**#SOURCE\_HEAT\_PHASE**

```

#SOURCE_HEAT_PHASE
1                ; type
0                ; mode
1                ; curve
4.5 0.0 1.0     ; x0,y0,z0
62.5            ; value0      [x0=4.5 m]
;
1                ; type
0                ; mode
1                ; curve
5.0 0.0 1.0     ; x0,y0,z0
125             ; value0      [x0=5.0 m]
;
1                ; type
0                ; mode
1                ; curve
5.5 0.0 1.0     ; x0,y0,z0
62.5            ; value0      [x0=5.5 m]

```

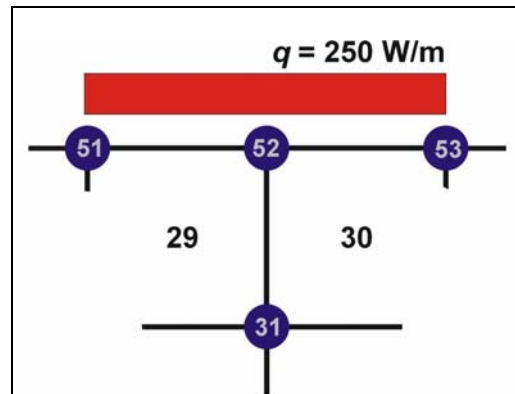


Abbildung 5: Zuweisung von Temperaturrandbedingungen

Die Zufuhr von Wärmeenergie ist in Form einer Linienquelle nach Abbildung 5 vorgegeben. Die Energie wird in der Simulation als Punktquellen an den Knoten 51, 52, 53 vorgegeben durch das Keyword „#SOURCE\_HEAT\_PHASE“ mit dem „type“ „1“. Durch Angabe der Kurvennummer mit „curve“ „1“ erfolgt eine zusätzliche Multiplikation mit dem Werten aus Kurve 1.

### #REFERENCE\_CONDITIONS

```
#REFERENCE_CONDITIONS
9.81                ; gravity
20.0               ; initial temperature
101325.0           ; initial pressure
```

Der Referenzzustand wird mit dem Keyword „#REFERENCE\_CONDITIONS“ definiert. Hierzu werden die Erdbeschleunigung, die Referenztemperatur sowie der Referenzdruck (Luftdruck) angegeben. Mittels Referenztemperatur  $T_0$  lässt sich die Größe der Wärmedehnung ( $\varepsilon_t$ ) wie folgt bestimmen:

$$\varepsilon_t = \alpha_t (T - T_0)$$

mit:  $\alpha_t$  Wärmeausdehnungskoeffizient

$$T_0 \geq 0 \text{ [K]}$$

Zu beachten ist, dass in diesem Beispiel die Angabe einer absoluten Temperatur in Kelvin nicht notwendig ist, so dass die Referenztemperatur mit 20 °C angegeben wurde.

**D1 - BEAM THM-2D (Coupled Processes with Single Phase Flow - 2D)****#FLUID\_PROPERTIES**

```
#FLUID_PROPERTIES
0 1000 ; density function, parameter
0 1.0e-003 ; viscosity function, parameter
1.0 ; real gas factor
4200 0.6 ; heat capacity, heat conductivity
```

Mit dem Keyword „#FLUID\_PROPERTIES“ werden die Parameter des Fluids u.a. Wärmekapazität zu 4200 J/(kg K) sowie Wärmeleitfähigkeit zu 0.6 W/(m K) angegeben.

**#SOLID\_PROPERTIES**

```
#SOLID_PROPERTIES
1 ; material model (1= linear elastic model)
1.0e+011 ; Young's modulus
2.e-001 ; Poisson's ratio
$THERMAL_EXPANSION_COEFFICIENT
1.2e-005 ; thermal expansion coefficient
```

Mit dem Schlüsselwort „#SOLID\_PROPERTIES“ werden die mechanischen Eigenschaften des Festkörpers spezifiziert. Dieses Keyword ist sowohl bei dem rein mechanischen Modell wie auch bei den unterschiedlich gekoppelten Modellen und Prozessen zu verwenden. Hier werden die Eigenschaften von dem porösen Stahl, der Elastizitätsmodul ( $E$ ), die Querkontraktionszahl ( $\nu$ ) und unter dem Sub-keyword „\$THERMAL\_EXPANSION\_COEFFICIENT“ der Wärmeausdehnungskoeffizient ( $\alpha_t$ ), angegeben. Da das Modell auf der linear elastischen Theorie basiert ist, wird „material\_model“ „1“ gesetzt.

**#SOIL\_PROPERTIES**

```
#SOIL_PROPERTIES
2 ; dimension
1.0 ; area
0 ; porosity model
0.5 ; porosity
1.0 ; tortuosity
0 ; mobile immobile model
0 ; lithological component
0 ; maximum sorption model
0 ; nonlinear flow parameter
0.0 ; storativity
0 ; permeability model
0 ; tensor type
1.0e-13 ; tensor data
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 ; k-S function
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 ; p-S function
5.0 0.0 ; mass dispersion parameters
0.5 0.0 ; heat dispersion parameters
7800 500 ; rock density, heat capacity
0 20.0 ; heat conductivity parameters
```

Unter dem Keyword „#SOIL\_PROPERTIES“ werden die Eigenschaften des porösen Mediums definiert. Fast alle Parameter und deren Einsätze sind schon in den vorherigen Übungen erwähnt worden (vgl. Tutorial A, B und C).

Mit den Keywords „rock density“ und „heat capacity“ werden die *Korndichte*  $\rho_s$  des porösen Stahlbalkens ( $\rho = (1-n) \rho_s = 0.5 \cdot 7800 \text{ kg/m}^3$ ) und die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs im porösen Balken (500 J/(kg K)) angegeben.

#CURVES

```
#CURVES                                ; curve 1
0.0                                     0.0
1.0e+005                               0.0
2.0e+005                               0.25
3.0e+005                               0.75
4.0e+005                               1.0
5.0e+005                               1.0
6.0e+005                               1.0
7.0e+005                               0.75
8.0e+005                               0.25
9.0e+005                               0.0
10.0e+005                              0.0
```

Mit dem Keyword „#CURVES“ wird die Zeitkurve definiert, die unter dem Keyword „#SOURCE\_HEAT\_PHASE“ verwendet wird. So wird die Zeitabhängigkeit der thermischen Beanspruchung simuliert. Eventuell notwendige Zwischenwerte werden durch lineare Interpolation ermittelt (Abbildung 6).

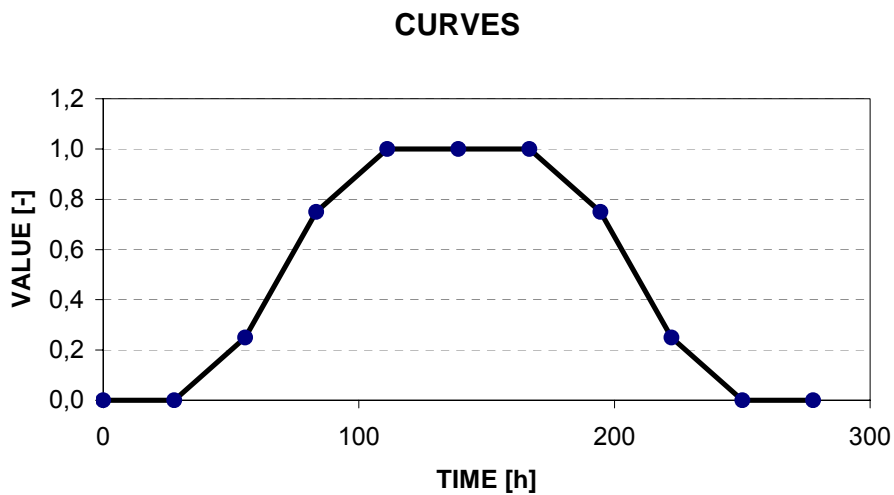


Abbildung 6: Zeitkurve 1

# Ausgabedateien

## RFO-Datei

BEAM\_THM\_2d.rfo

BEAM\_TH\_2d.rfo

BEAM\_TM\_2d.rfo

Aufbau der RFO-Datei: siehe Tutorial A.

## PLT- Datei

\*\_2D.plt

In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der zweidimensionalen THM – Simulation dargestellt (alle drei Prozesse eingeschaltet).

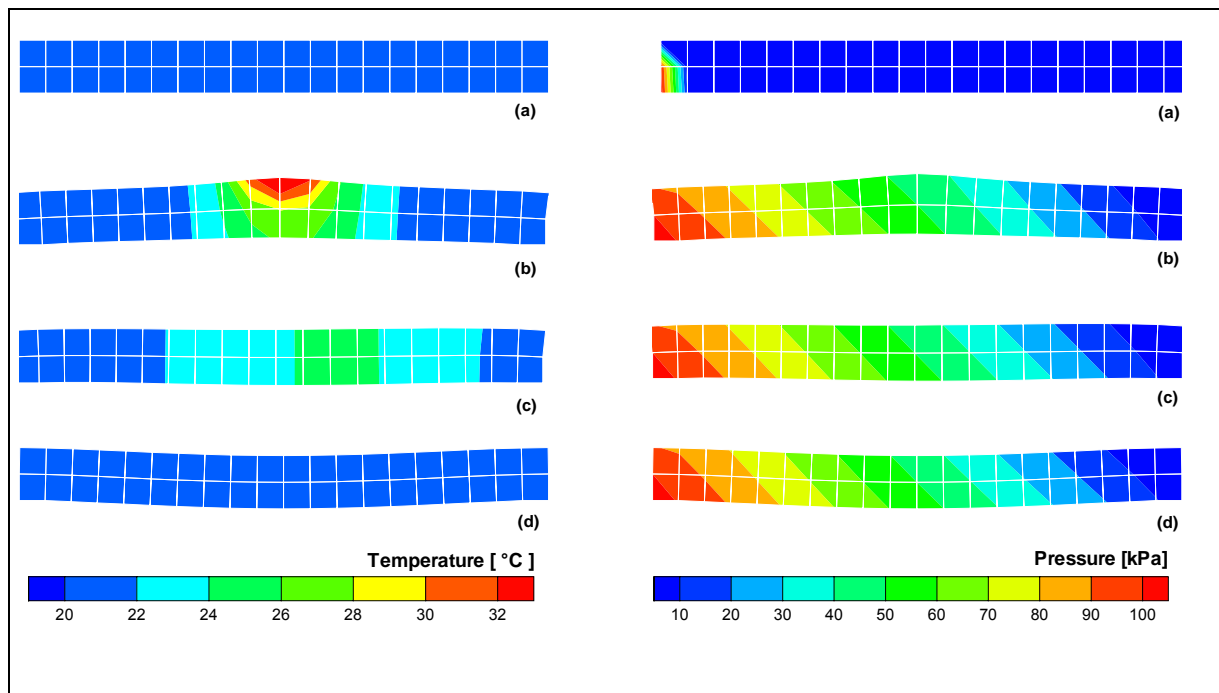
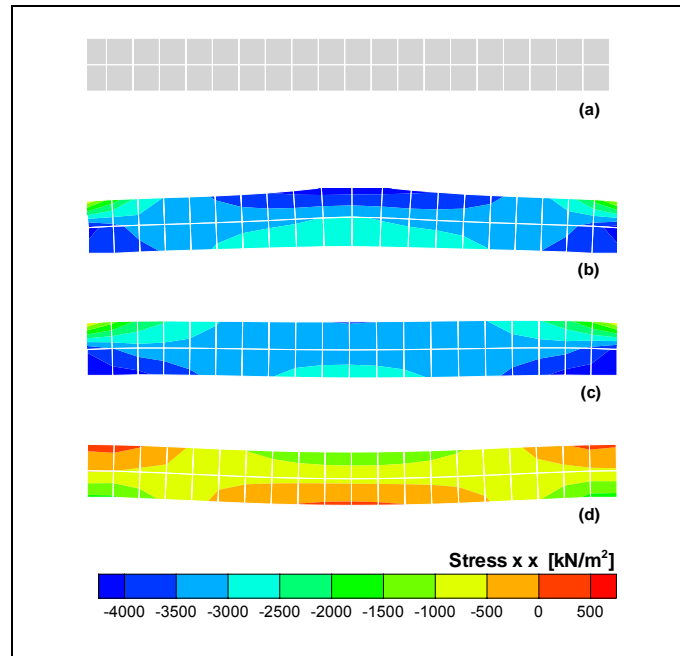


Abbildung 7: THM – Simulation: Temperatur und Wasserdruck zu den Zeitpunkten  $t = 0$  s (a),  $t = 168$  h (b),  $t = 504$  h (c) und  $t = 2016$  h (d)

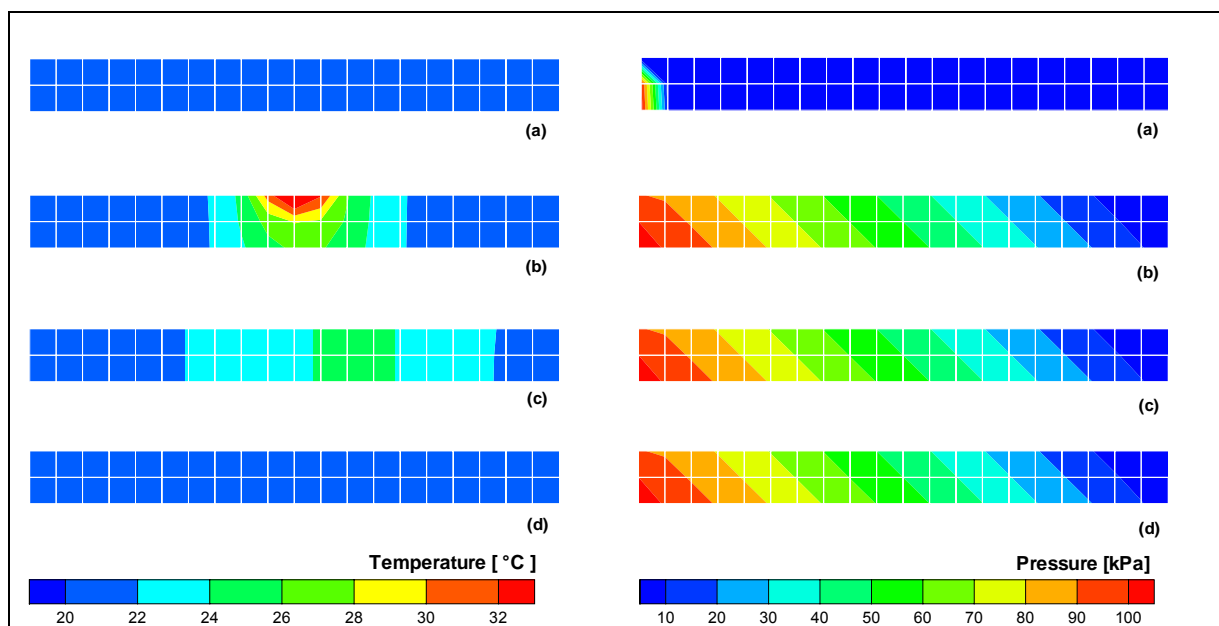
**D1 - BEAM THM-2D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 2D)

Abbildung 7 zeigt die Temperatur und den Wasserdruck zu den verschiedenen Zeitpunkten. Wie das Bild zeigt, bleibt der Druck konstant, während sich die Temperatur entlang des Balkens auf Grund der Wasserbewegung ändert. Der Einfluss des Eigengewichts und der thermischen Ausdehnung sind ebenso in den beiden Bildern zu erkennen.



**Abbildung 8: THM – Simulation: Spannung  $\sigma_{xx}$  zu den Zeitpunkten: unverformter Anfangszustand (a),  $t = 168$  h (b),  $t = 504$  h (c) und  $t = 2016$  h (d)**

In Abbildung 8 ist exemplarisch die Spannung ( $\sigma_{xx}$ ) dargestellt. Hier werden nach wie vor die Ergebnisse von den vier Zeitpunkten, a, b, c und d betrachtet.

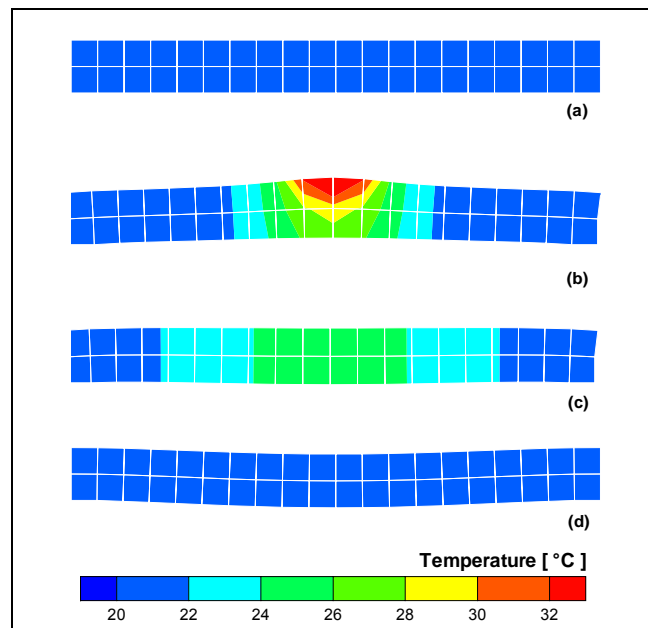


**Abbildung 9 : TH – Simulation: Temperatur und Wasserdruck zu den Zeitpunkten:  $t = 0$  s (a),  $t = 168$  h (b),  $t = 504$  h (c) und  $t = 2016$  h (d)**



**D1 - BEAM THM-2D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 2D)



In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der TH – Simulation exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 10: TM- Simulation: Temperatur zu den Zeitpunkten:  
 $t = 0$  s (a),  $t = 168$  h (b),  $t = 504$  h (c) und  $t = 2016$  h (d)**

Abbildung 10 zeigt die thermomechanische Simulation ohne die Berücksichtigung der Fluidströmung. Die Wärmeübertragung erfolgt hier nur durch Wärmeleitung im Festkörper. Dadurch ergibt sich im Temperatur- und Verschiebungsfeld eine Symmetrie zur Mitte des Balkens.

**D2 - BEAM THM-3D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)

RockFlow Tutorial <b>D2</b>	<h1>BEAM THM-3D</h1> <p>(Thermo-Hydro-Mechanics)</p>	single phase flow
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modellierung gekoppelter Prozesse</li> <li>▪ Vergleich der Simulationsergebnisse in 2D und 3D</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ THM<sub>plus</sub> - Modell „18460“</li> <li>▪ Keywords: <a href="#">vgl. D1</a></li> </ul>	
<p>Betrachtet wird der homogene, mit Wasser gesättigte poröse Balken (siehe BEAM THM-2D), der hier dreidimensional simuliert wird (Abbildung 11). Unter denselben Randbedingungen soll mit diesem dreidimensionalen Modell die thermisch – hydraulisch – mechanisch (THM) gekoppelte Berechnung durchgeführt und die Ergebnisse mit denen der 2D - Simulation verglichen werden.</p>		

Vorgehensweise:

Neben der Simulation der THM - Prozesse wird auch der Verfeinerungsgrad des Modells erhöht (Konvergenztest) und ein Vergleich mit den Ergebnissen der 2D-Simulation durchgeführt.

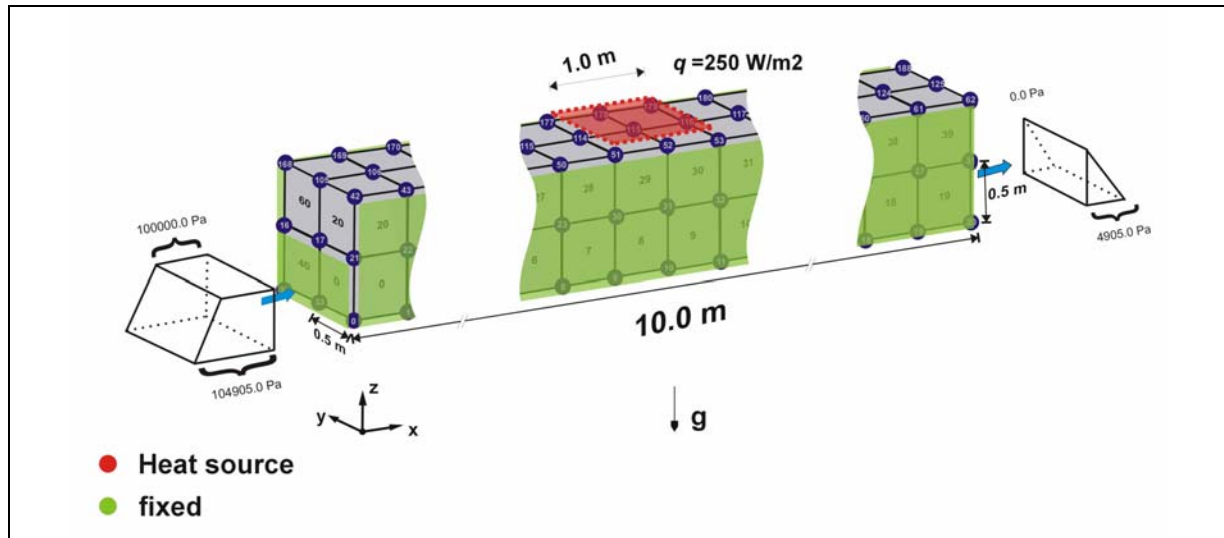


Abbildung 11: Systemskizze THM-Modell 3D

## Eingabedateien

### RFI-Datei

BEAM\_THM\_3d.rfi  
 BEAM\_TM\_3d.rfi  
 BEAM\_TH\_3d.rfi

Die Modellierung erfolgt dreidimensional. Der Balken wird durch 80 Hexaeder-Elemente mit insgesamt 189 Knoten diskretisiert (Abbildung 11).

### RFD-Datei

BEAM\_THM\_3d.rfd  
 BEAM\_TM\_3d.rfd  
 BEAM\_TH\_3d.rfd

Sämtliche Schlüsselwörter der 2D - Simulation werden auch hier eingesetzt (siehe BEAM THM-2D). Deshalb werden nur diejenigen Keywords erläutert, die von dem letzten Beispiel abweichen.

**D2 - BEAM THM-3D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)**#BOUNDARY\_CONDITIONS\_PRESSURE****#BOUNDARY\_CONDITIONS\_TEMPERATURE****#BOUNDARY\_CONDITIONS\_DISPLACEMENT\_X****#BOUNDARY\_CONDITIONS\_DISPLACEMENT\_Y****#BOUNDARY\_CONDITIONS\_DISPLACEMENT\_Z**

```

#BOUNDARY_CONDITIONS_PRESSURE
; left (x=0.0)
16                ; type
0                 ; mode
0                 ; curve
0.0 0.0 0.0       ; x0,y0,z0
104905.0          ; value0
0.0 1.0 0.0       ; x1,y1,z1
104905.0          ; value1
0.0 1.0 0.5       ; x2,y2,z2
100000.0          ; value2
0.0 0.0 0.5       ; x3,y3,z3
100000.0          ; value3
1.0e-003          ; epsilon
; right (x=10.0)
16                ; type
0                 ; mode
0                 ; curve
10.0 0.0 0.0      ; x0,y0,z0
4905.0            ; value0
10.0 1.0 0.0      ; x1,y1,z1
4905.0            ; value1
10.0 1.0 0.5      ; x2,y2,z2
0.0              ; value2
10.0 0.0 0.5      ; x3,y3,z3
0.0              ; value3
1.0e-003          ; epsilon
;
#BOUNDARY_CONDITIONS_TEMPERATURE
#BOUNDARY_CONDITIONS_DISPLACEMENT_X
#BOUNDARY_CONDITIONS_DISPLACEMENT_Z
#BOUNDARY_CONDITIONS_DISPLACEMENT_Y
16                ; type
0                 ; mode
0                 ; curve
0.0 0.0 0.0       ; x0,y0,z0
0.0              ; value0
10.0 0.0 0.0      ; x1,y1,z1
104905.0          ; value1
10.0 0.0 1.0      ; x2,y2,z2
0.0              ; value2
0.0 0.0 1.0       ; x3,y3,z3
0.0              ; value3
1.0e-003          ; epsilon
;
16                ; type
0                 ; mode
0                 ; curve
0.0 1.0 0.0       ; x0,y0,z0
0.0              ; value0
10.0 1.0 0.0      ; x1,y1,z1
0.0              ; value1
10.0 1.0 1.0      ; x2,y2,z2
0.0              ; value2
0.0 1.0 1.0       ; x3,y3,z3
0.0              ; value3
1.0e-003          ; epsilon

```

Mit dem „**type**“ „16“ erfolgt, abweichend von der 2D-Simulation, eine bilineare Zuweisung von Randbedingungen (Druck, Temperatur, Verschiebung) über ein Viereck, dessen Position durch die Angabe der Koordinaten festgelegt wird (siehe Abbildung 11).

## PLT- Datei

\*\_3D.plt

In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der dreidimensionalen THM –Simulation dargestellt (alle drei Prozesse eingeschaltet).

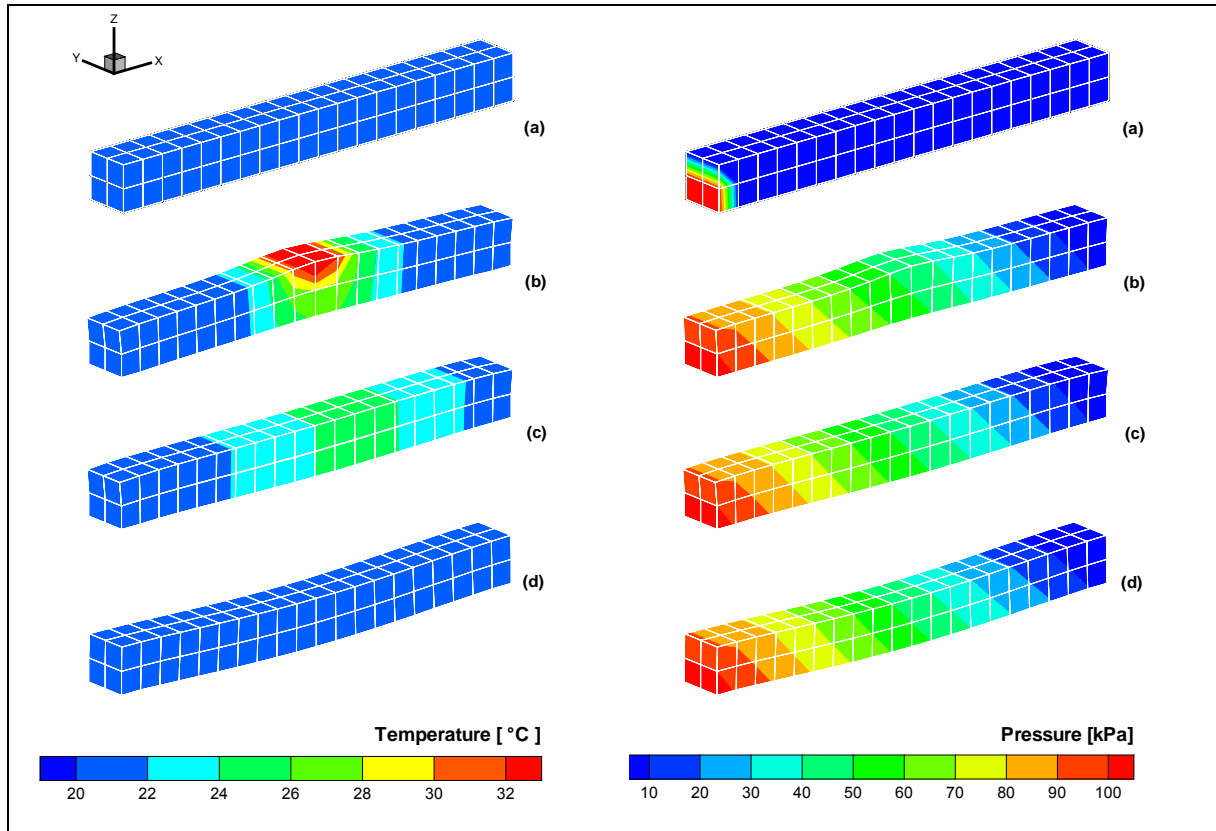
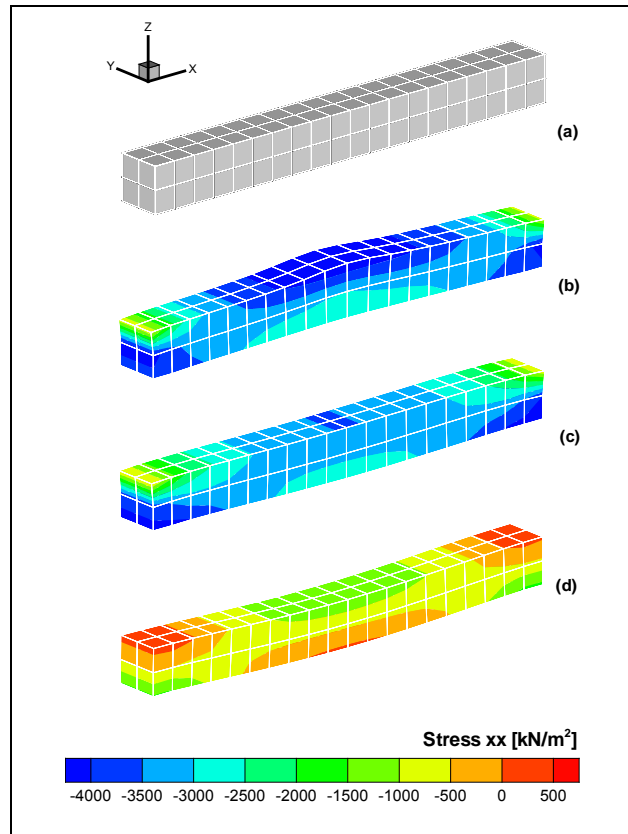


Abbildung 12: THM – Simulation: Temperatur und Wasserdruck zu den Zeitpunkten:  
 $t = 0$  s (a),  $t = 168$  h (b),  $t = 504$  h (c) und  $t = 2016$  h (d)

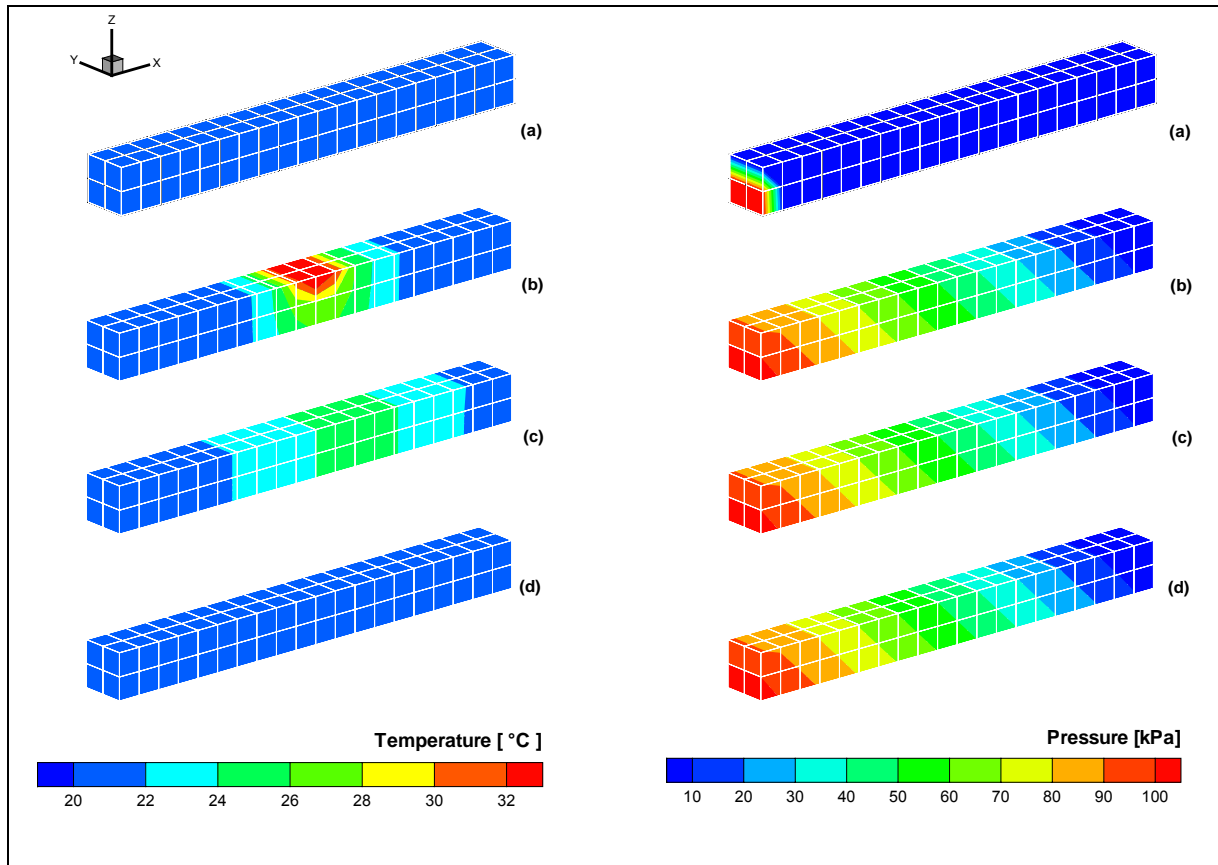
Abbildung 12 zeigt den Verlauf von Temperatur und Wasserdruck. Die Spannung ( $\sigma_{xx}$ ) ist in Abbildung 13 dargestellt. Der Vergleich der Ergebnisse aus zwei- und dreidimensionaler Berechnung zeigt, wie zu erwarten, gleiche Ergebnisse (Abbildung 7 und Abbildung 8).

**D2 - BEAM THM-3D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)

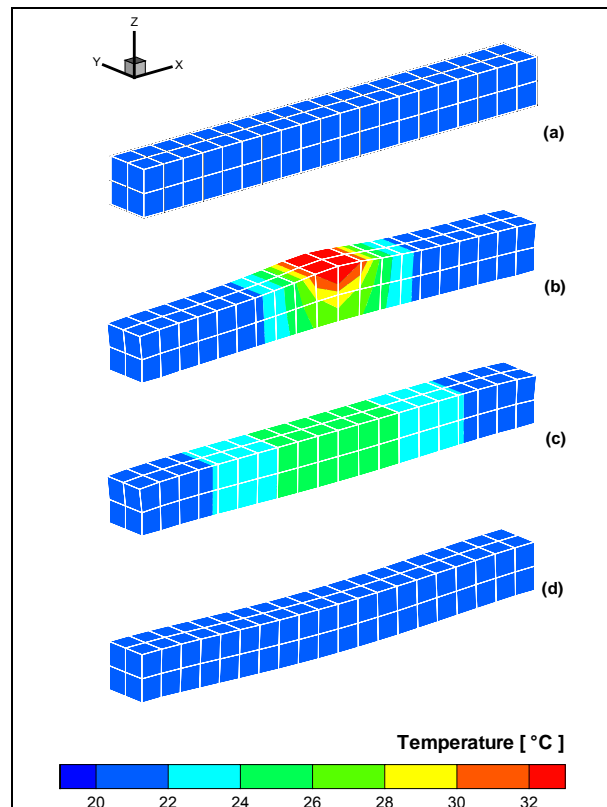
**Abbildung 13: THM – Simulation: Normalspannung in x-Richtung zu den Zeitpunkten: unverformter Anfangszustand (a),  $t = 168$  h (b),  $t = 504$  h (c),  $t = 2016$  h (d)**

Abbildung 14 stellt exemplarisch die Ergebnisse der TH-Simulation (2D siehe Abbildung 9) und Abbildung 15 die zeitliche Temperaturänderung bei der TM - Simulation (2D siehe Abbildung 10). Ein Vergleich zwischen diesen Ergebnissen und denen aus der 2D-Modellierung zeigt eine gute Übereinstimmung.

**D2 - BEAM THM-3D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)



**Abbildung 14: TH – Simulation: Temperatur und Wasserdruck zu den Zeitpunkten:  $t = 0$  s (a),  $t = 168$  h (b),  $t = 504$  h (c) und  $t = 2016$  h (d)**



**Abbildung 15: TM- Simulation: Temperatur zu den Zeitpunkten:  
 $t = 0$  s (a),  $t = 168$  h (b),  $t = 504$  h (c) und  $t = 2016$  h (d)**

## Interpretation der Ergebnisse

An dieser Stelle soll die quantitative Übereinstimmung zwischen 2D- und 3D-Simulationen genauer untersucht werden. Es werden dazu zunächst Berechnungsergebnisse mit unterschiedlichen Verfeinerungsstufen (siehe Abbildung 16) gegenübergestellt.

Zu diesem Zweck werden 2D und 3D Konvergenzuntersuchungen mit zunehmender Verfeinerung durchgeführt (Stufe: a, b und c in Abbildung 16). Der Vergleich der zwei- und dreidimensionalen Ergebnisse erfolgt in der Mitte des Balkens im Punkt (5.0 m, 0.5 m, 1.0 m) (siehe Abbildung 17).

Die Ergebnisse der Konvergenzuntersuchungen sind in Abbildung 18 exemplarisch für die 2DTHM-Simulation dargestellt. Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die Übereinstimmung der zwei- und dreidimensionalen Berechnungen in THM- bzw. TM-Simulation.



**D2 - BEAM THM-3D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)

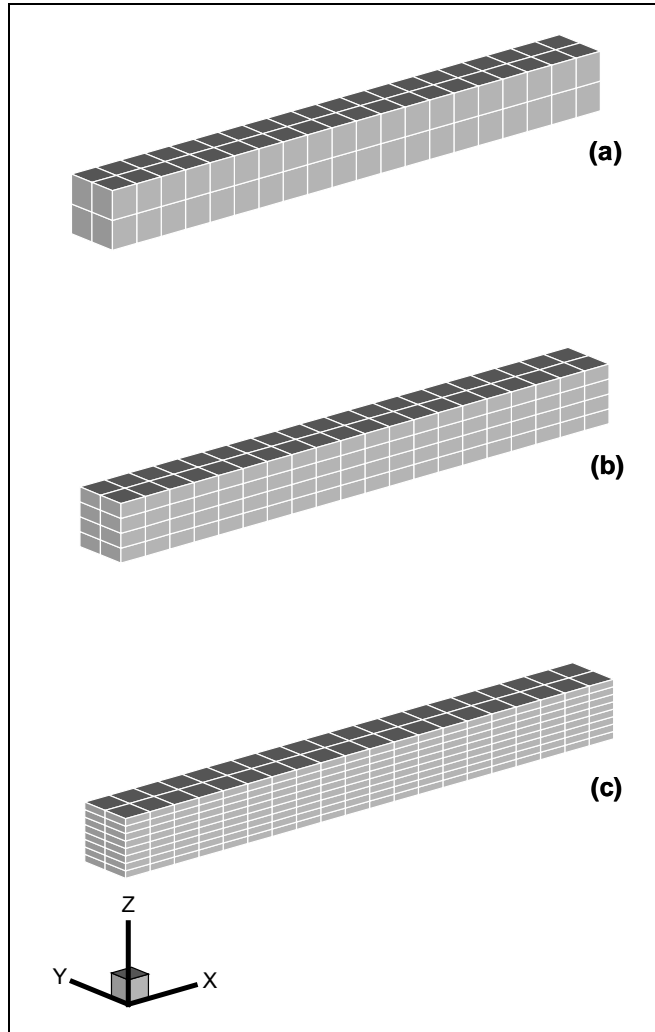


Abbildung 16: Die eingesetzten Verfeinerungsstufen

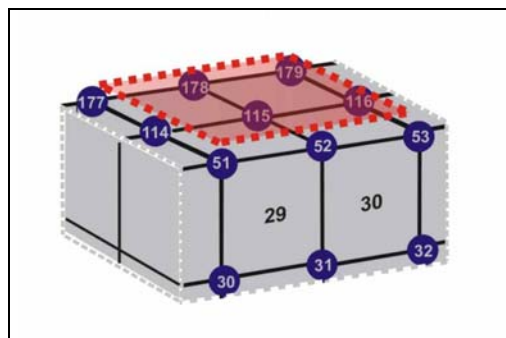


Abbildung 17: Position des ausgewerteten Punktes (Stufe (a): Knoten Nr. 115)

D2 - BEAM THM-3D (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)

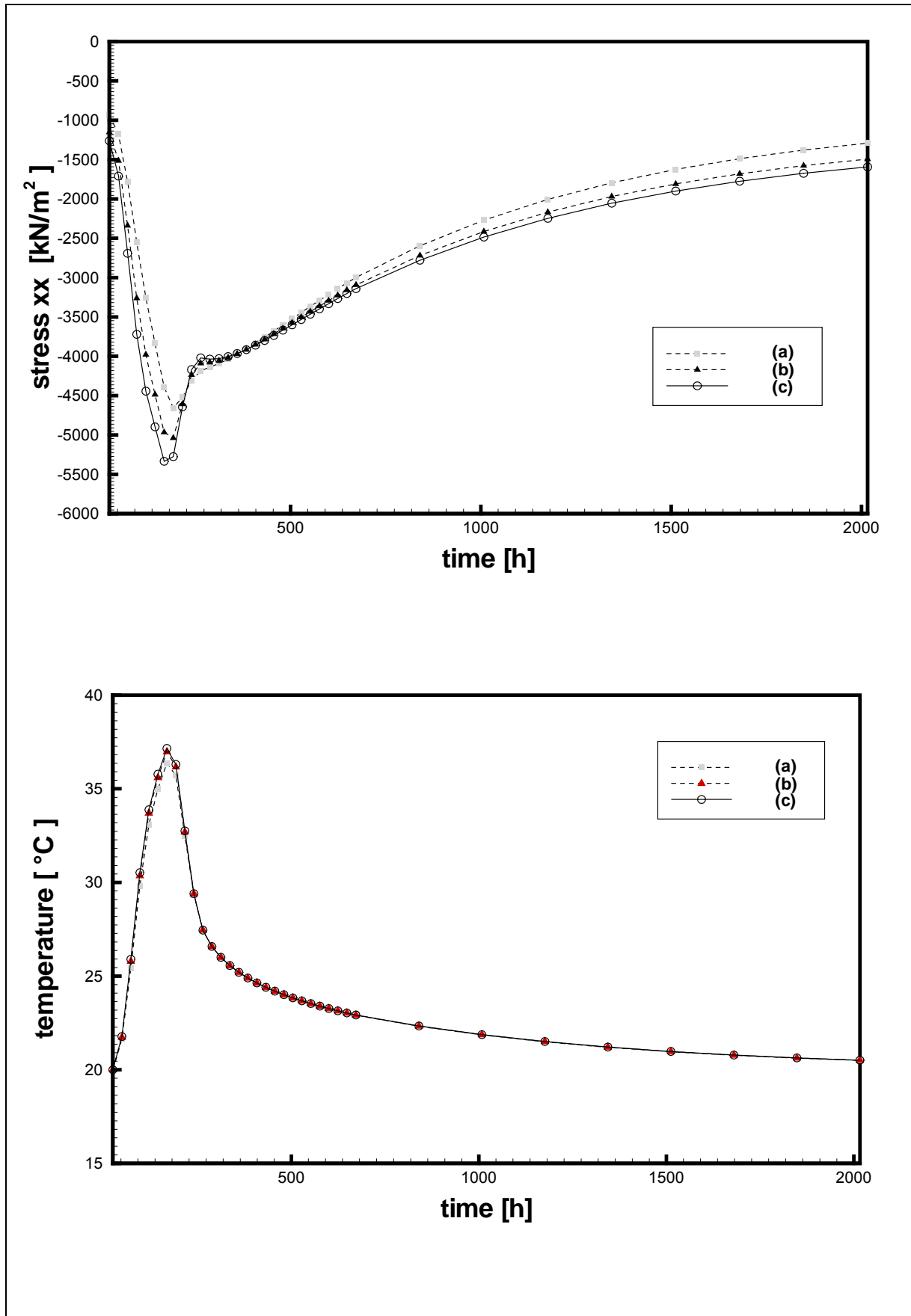


Abbildung 18: 2D THM - Simulation: Spannungs- und Temperaturverlauf (x = 5.0 m und z = 1.0)

D2 - BEAM THM-3D (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)

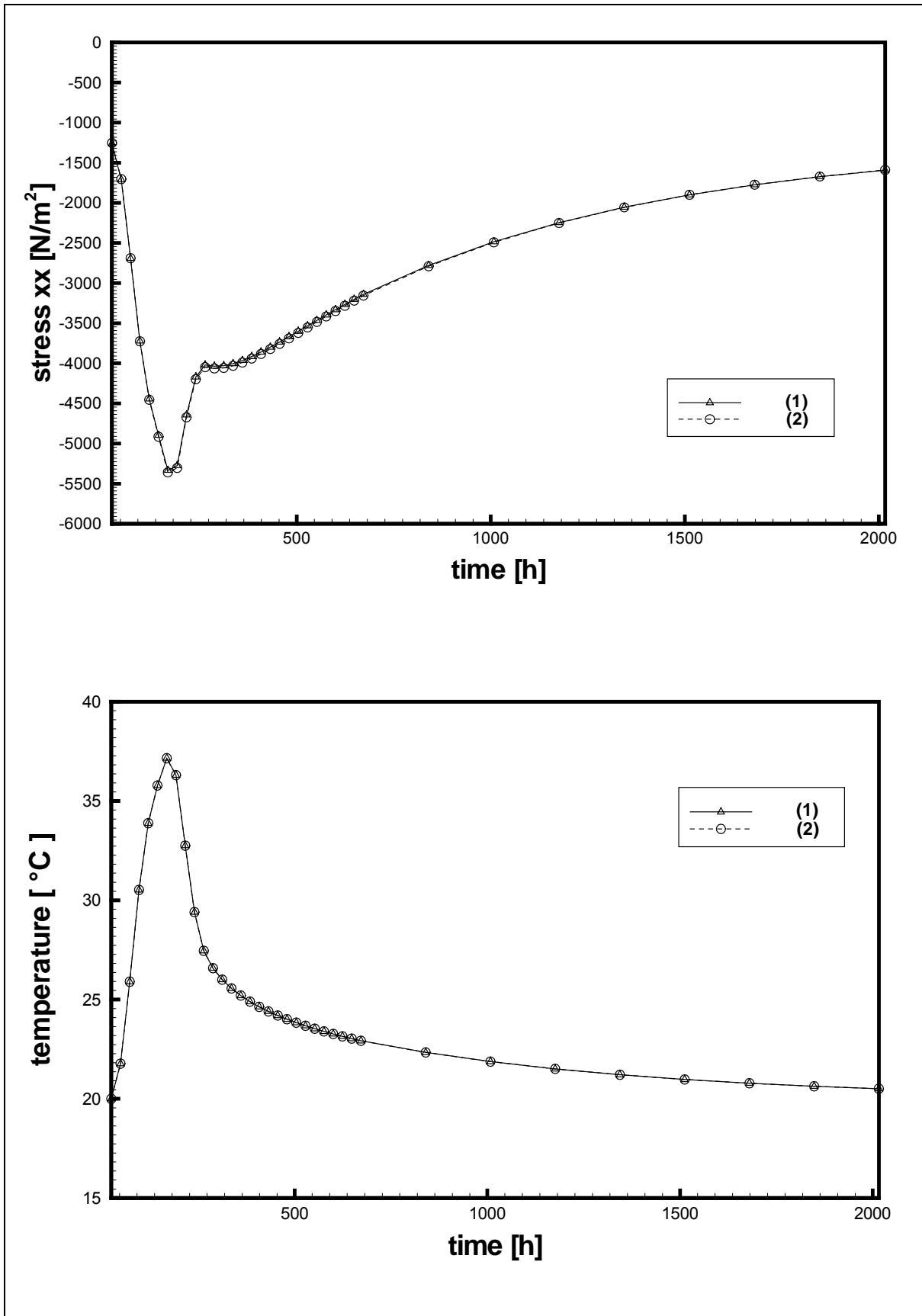


Abbildung 19: THM - Simulation: Spannungs- und Temperaturverlauf in 2D (Kurve 1) und 3D (Kurve 2) ( $x = 5.0$  m und  $z = 1.0$  m)

**D2 - BEAM THM-3D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)

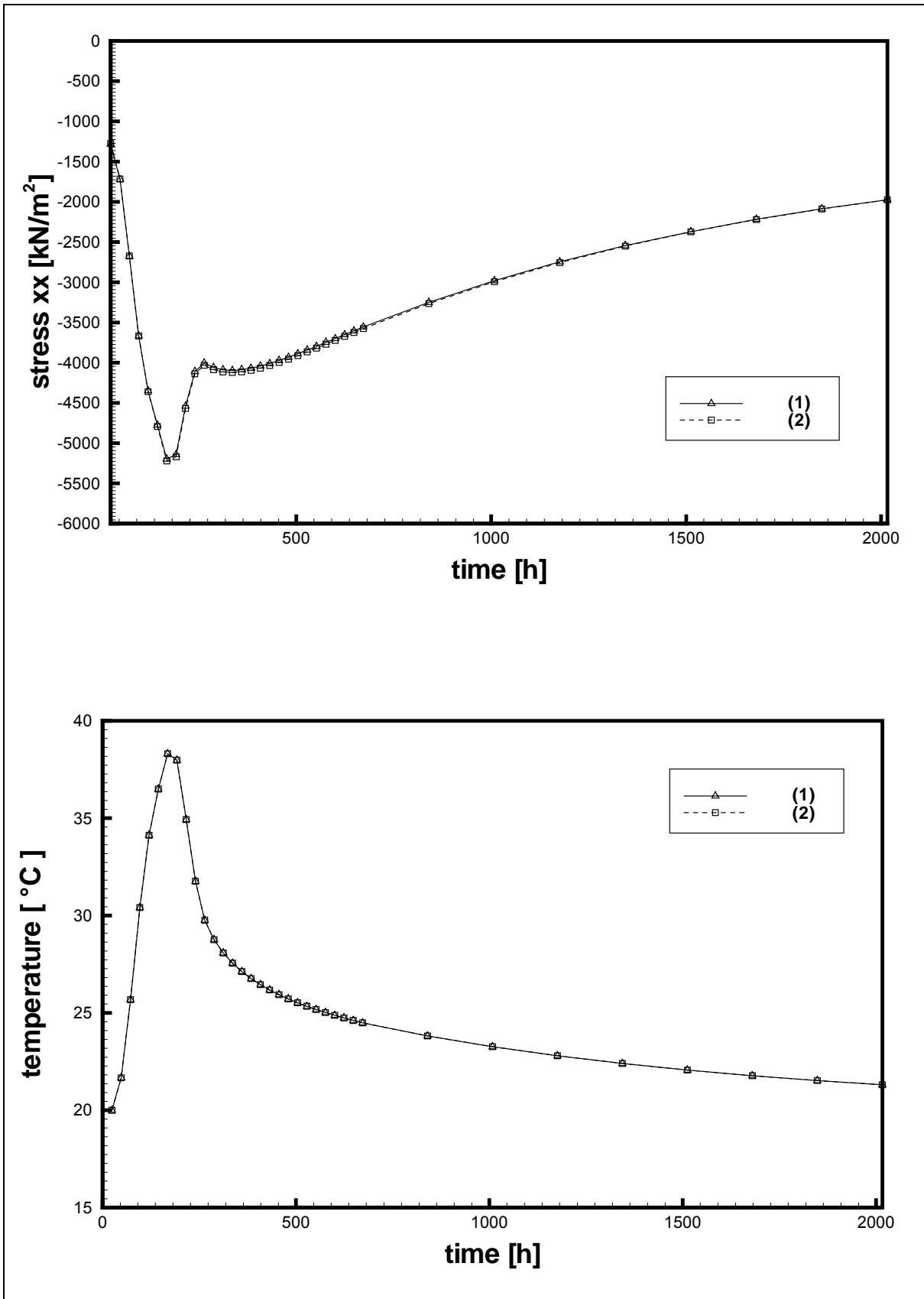


Abbildung 20: TM - Simulation: Spannungs- und Temperaturverlauf in 2D (Kurve 1) und 3D (Kurve 2) ( $x = 5.0 \text{ m}$  und  $z = 1.0 \text{ m}$ )

**D2 - BEAM THM-3D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)

Die in den letzten Abbildungen dargestellten Spannungsverläufe zeigen eine deutliche Spannungszunahme bis zum achten Zeitschritt ( $t=168$  h), die sowohl auf lokale Transportgradienten als auch auf die Gesamterwärmung des Balkens zurückzuführen sind .

Von hier bis zum elften Zeitschritt ( $t=240$  h) ist die Spannungsabnahme, bezüglich des lokalen Temperaturgradienten, rasch.

Sobald lokale Transportgradienten ausgeglichen sind, nehmen auch die Druckspannungen im Balken mit abnehmender Temperatur wieder ab.

Der Prozess der Abkühlung wird durch die Größe der Fließgeschwindigkeit bestimmt und ist somit von der Permeabilität des Festkörpers abhängig. Ihr Einfluss wird in den Abbildung 21 und Abbildung 22 verdeutlicht.

Die Bilder zeigen bei höherer Permeabilität eine schnellere Abkühlung des Balkens, welche durch die erhöhte Advektion hervorgerufen wird.

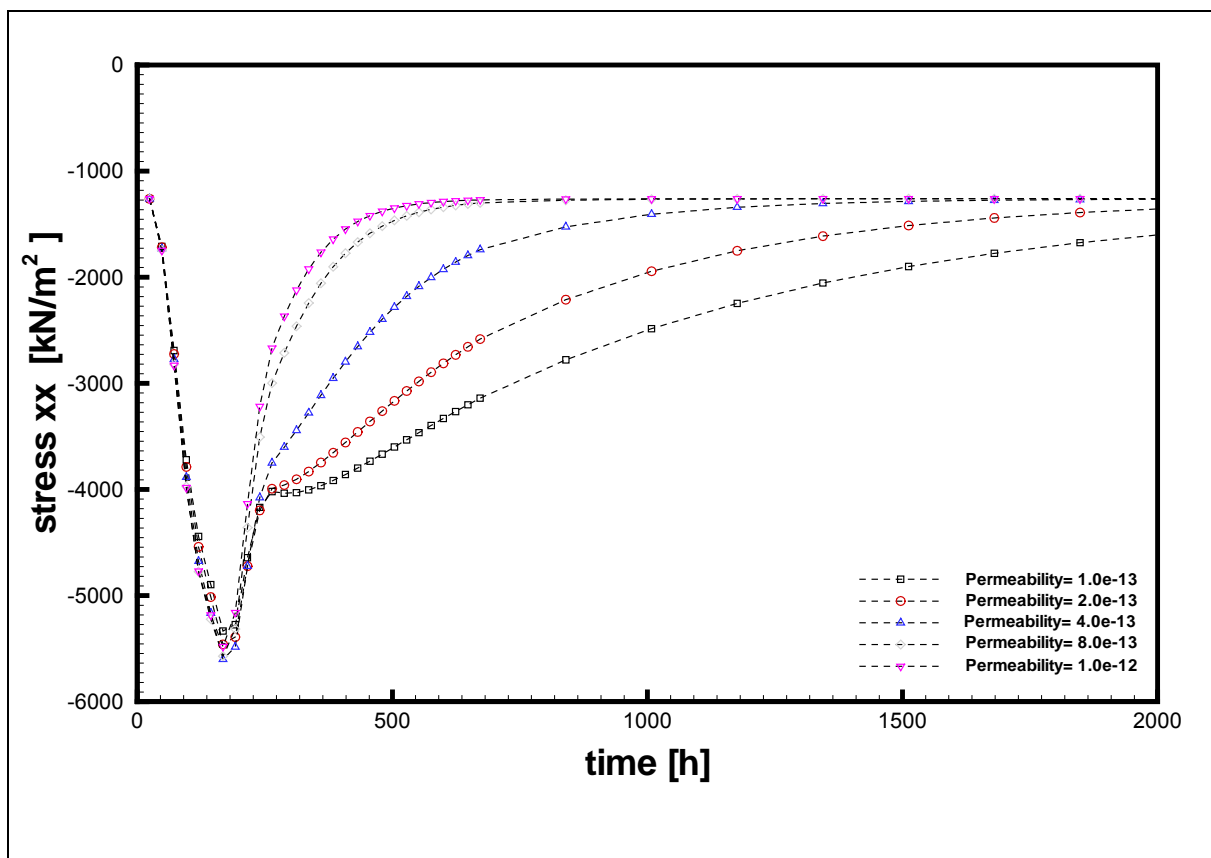


Abbildung 21: 2D THM - Simulation: Einfluss der Permeabilität in Spannungsverlauf ( $x = 5.0$  m und  $z = 1.0$ )

**D2 - BEAM THM-3D** (Coupled Processes with Single Phase Flow - 3D)

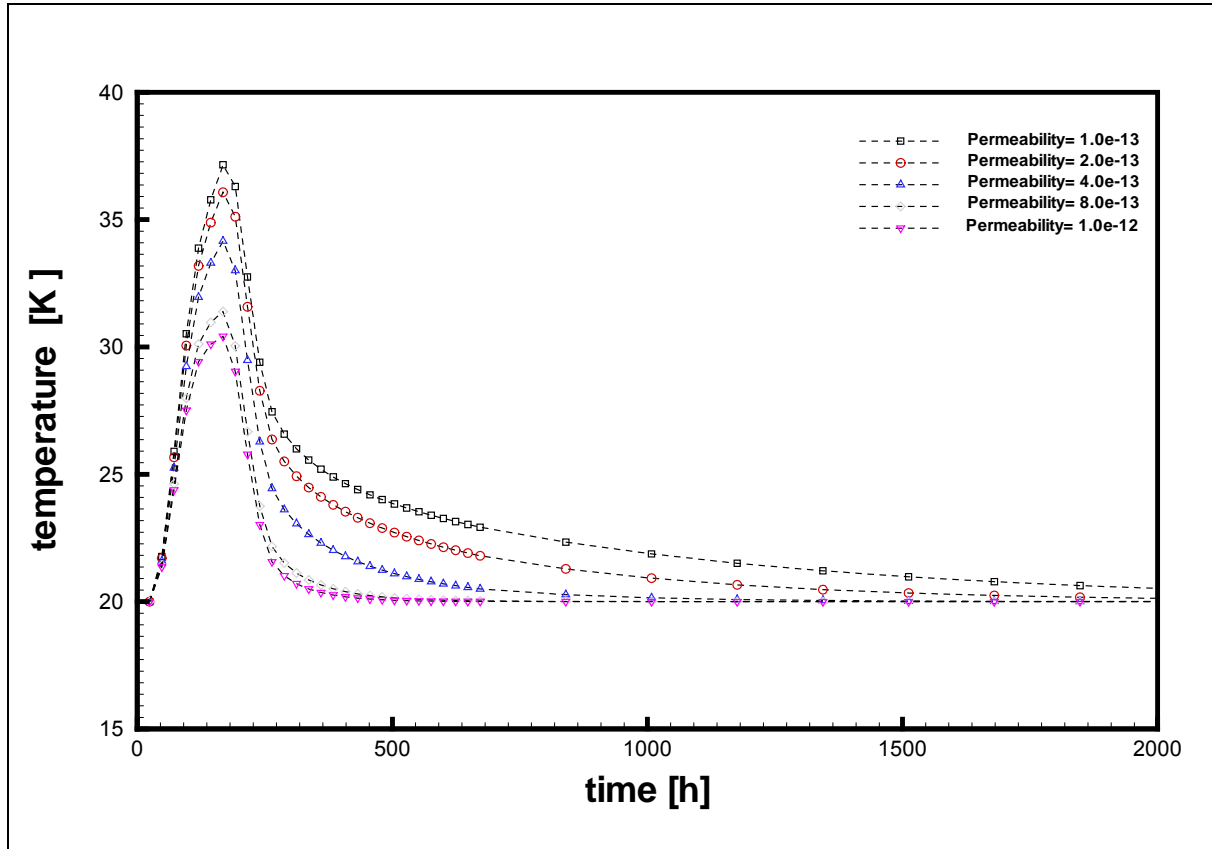


Abbildung 22: 2D THM - Simulation: Einfluss der Permeabilität in Temperaturverlauf (x = 5.0 m und z = 1.0)