

Projekt ANSICHT

Stoffmodell zur Abhängigkeit der Permeabilität vom Spannungszustand und der plastischen Dehnung im Tonstein



| PROJ | PSP | OBJ | FUNK | KOMP | BAUG | AG | UA | LFNR | RV |
|------|-----|-----|------|------|------|----|----|------|----|
| FE | | | | | | BE | BY | 0011 | 00 |

DOKID: 11780529
ULV-Nr.: 659485

Projekt ANSICHT

Stoffmodell zur Abhängigkeit der Permeabilität vom Spannungszustand und der plastischen Dehnung im Tonstein

Johanna Wolf & Michael Jobmann

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Vorhabens **ANSICHT**
(Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-
Endlager im Tonstein)

Auftraggeber: KIT (PTKA-WTE) FKZ: 02E11061B
Berichtsnummer: TEC-15-2015-TB

Peine, 29.08.2014

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi von der BGR sowie vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) von DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung..... | 2 |
| 2 | Voraussetzung für die Anwendung des Stoffgesetzes | 3 |
| 3 | Beschreibung des Stoffgesetzes..... | 4 |
| 3.1 | Spannungsabhängiger Anteil an der Permeabilität | 4 |
| 3.1.1 | Spannungsabhängiger Anteil an der Permeabilität parallel zur Schichtfläche | 4 |
| 3.1.2 | Spannungsabhängiger Anteil an der Permeabilität senkrecht zur Schichtfläche | 5 |
| 3.2 | Vom Vektor der plastischen Dehnungen abhängiger Anteil an der Permeabilität..... | 6 |
| 4 | Beispiel..... | 7 |
| 4.1 | TED-Versuch | 7 |
| 4.2 | Permeabilität bedingt durch den lithostatischen Druck..... | 8 |
| 4.3 | Permeabilität zu verschiedenen Zeitpunkten..... | 9 |
| 4.4 | Spannungsabhängige Permeabilität im in zwei ausgewählten Zonen | 11 |
| 4.5 | Spannungs- und dehnungsabhängige Anteile der Permeabilität..... | 15 |
| 4.5.1 | Spannungsabhängige Anteile | 15 |
| 4.5.2 | Dehnungsabhängige Anteile..... | 17 |
| 4.6 | Zeitliche Entwicklung der Spannungen und Dehnungen und der dazugehörigen Permeabilitäten | 19 |
| 5 | Zusammenfassung | 22 |
| | Literaturverzeichnis | 23 |
| | Anhang (Programmroutine) | 24 |

1 Einleitung

Der vorliegende Kurzbericht dokumentiert das Stoffmodell „Permeabilität abhängig vom Spannungszustand und dem Vektor der plastischen Dehnungen“, das als Fish-Routine für das Programm FLAC3D 5.01 (Itasca 2014) geschrieben wurde. Das Stoffmodell setzt die in Vymatil et al. (2012) formulierte Abhängigkeit der Permeabilität vom Spannungszustand und dem Vektor der plastischen Dehnungen um.

2 Voraussetzung für die Anwendung des Stoffgesetzes

Das Stoffgesetz wird als Fish-Routine in ein bestehendes Berechnungsmodell eingebunden. Die Fish-Routine ist in der Datei perm.fis enthalten und sie wird durch Aufruf dieser Datei (call perm.fis) aufgerufen.

Das Stoffgesetz unterliegt folgenden Voraussetzungen:

- Zugrunde liegt die Annahme eines Tongesteins, der eine horizontale Schichtung aufweist. Das heißt, dass die Schichtflächen horizontal verlaufen und parallel zur x-y-Ebene des Modells liegen. Die Normale zu den Schichtflächen entspricht der z-Richtung im Modell.
- Die Routine muss zu dem Zeitpunkt aufgerufen werden, zu dem ein mechanisches, hydraulisches und thermisches Gleichgewicht vorliegt. Die Routine macht zu diesem Zeitpunkt folgendes:
 - Verschiebungsvektor auf Null setzen (ini xd 0 yd 0 zd 0)
 - Gridpoint-Geschwindigkeiten auf Null setzen (ini xvcl 0 yvel 0 zvel 0) – das dient nur der numerischen Stabilität
- Die Routine deckt NICHT den Fall ab, dass der Verschiebungsvektor im Laufe der Berechnung auf Null gesetzt wird.
- AUFPASSEN: Für Zonen, die zum Zeitpunkt des erstmaligen Aufrufs der Datei perm.fis, Nullzonen waren, wird keine "initiale Temperatur" bzw. "initiale elastische Dehnung" erhoben. BZW: die Routine wird nur auf die Zonen korrekt angewendet, die zum Zeitpunkt des Aufrufs der Routine NICHT NULL waren.
- Die Routine deckt NICHT den Fall ab, dass nach dem ersten Aufruf der Routine neue Zonen hinzukommen. Für neu hinzugekommene Zonen wird die "initiale Temperatur" (z_var_extra_temp_ini) bzw. die "initiale elastische Dehnung" nicht erhoben.
- Die Routine perm.fis funktioniert für Kelvin und Grad Celsius.

3 Beschreibung des Stoffgesetzes

Die Permeabilität wird abhängig vom effektiven Spannungszustand und dem Vektor der plastischen Dehnungen berechnet, wie in (Vymlatil & Schlegel 2012) beschrieben. Nachfolgend werden die in (Vymlatil & Schlegel 2012) beschriebenen Zusammenhänge dargelegt.

Die Permeabilität k_i setzt sich aus einem Anteil zusammen, der von dem effektiven Spannungszustand σ abhängt und einem Anteil, der von dem Vektor der plastischen Dehnungen ε^{pl} abhängt:

$$k_i = k_{\sigma,i} + k_{\varepsilon,i} \quad \text{für } i = x, y, z \quad (3.1)$$

Die effektive Spannung $\sigma_{eff,i}$ ist

$$\sigma_{eff,i} = \sigma_{t,i} - \alpha p \quad \text{für } i = x, y, z \quad (3.2)$$

| | | | |
|-----|----------------|------|------------------|
| mit | $\sigma_{t,i}$ | [Pa] | Totale Spannung |
| | α | [-] | Biot-Koeffizient |
| | p | [Pa] | Porenwasserdruck |

3.1 Spannungsabhängiger Anteil an der Permeabilität

3.1.1 Spannungsabhängiger Anteil an der Permeabilität parallel zur Schichtfläche

Die Funktion der Permeabilität in den horizontalen Richtungen x, y (parallel zur Schichtfläche) $k_{\sigma,p} = k_{\sigma,x} = k_{\sigma,y}$ wird definiert als:

$$k_{\sigma,x} = k_{\sigma,y} = k_{\sigma,p} = k_{0,p} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff,z}}{\sigma_0} \right)^{-n_p} \quad (3.3)$$

| | | | |
|-----|------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| mit | $\sigma_{eff,z}$ | [Pa] | vertikale effektive Spannung |
| | σ_0 | = 1,0 [MPa] | Normierungsspannung |
| | $k_{0,p}$ | = 6,0E-19 [m ²] | Konstante (Vymlatil et al. 2012) |
| | n_p | = 0,8 [-] | Konstante (Vymlatil et al. 2012) |

Die Abb. 3.1 zeigt den in (3.3) beschriebenen Zusammenhang.

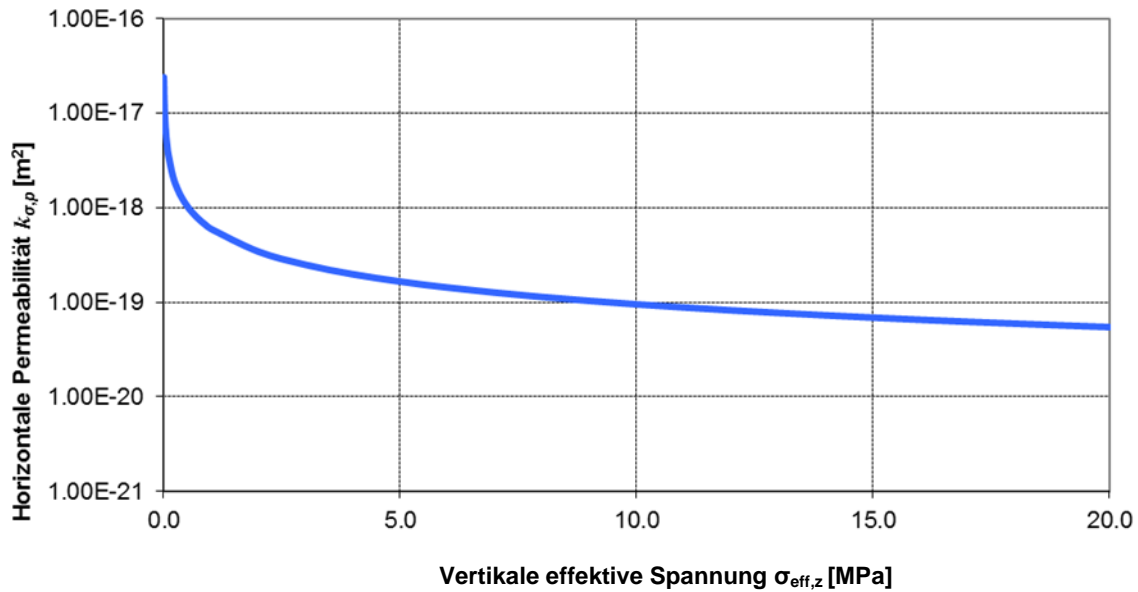


Abb. 3.1: Abhängigkeit zwischen der vertikalen effektiven Spannung $\sigma_{eff,z}$ und der horizontalen Permeabilität $k_{\sigma,p}$

3.1.2 Spannungsabhängiger Anteil an der Permeabilität senkrecht zur Schichtfläche

Die Funktion der Permeabilität in der vertikalen Richtung z (normal zur Schichtfläche) $k_{\sigma,n} = k_{\sigma,z}$ wird definiert als:

$$k_{\sigma,z} = k_{\sigma,n} = k_{0,n} \cdot \left(\frac{\sigma_{eff,m}}{\sigma_0} \right)^{-n_n} \quad (3.4)$$

| | | |
|-----|---|---|
| mit | $\sigma_{eff,m} = \frac{\sigma_{eff,x} + \sigma_{eff,y}}{2}$ [Pa] | Mittelwert der horizontalen effektiven Spannungen |
| | $\sigma_0 = 1,0$ [MPa] | Normierungsspannung |
| | $k_{0,n} = 1,5E-20$ [m ²] | Materialparameter (Vymlatil et al. 2012) |
| | $n_n = 0,2$ [-] | Materialparameter (Vymlatil et al. 2012) |

Abb. 3.2 zeigt den in (3.4) beschriebenen Zusammenhang.

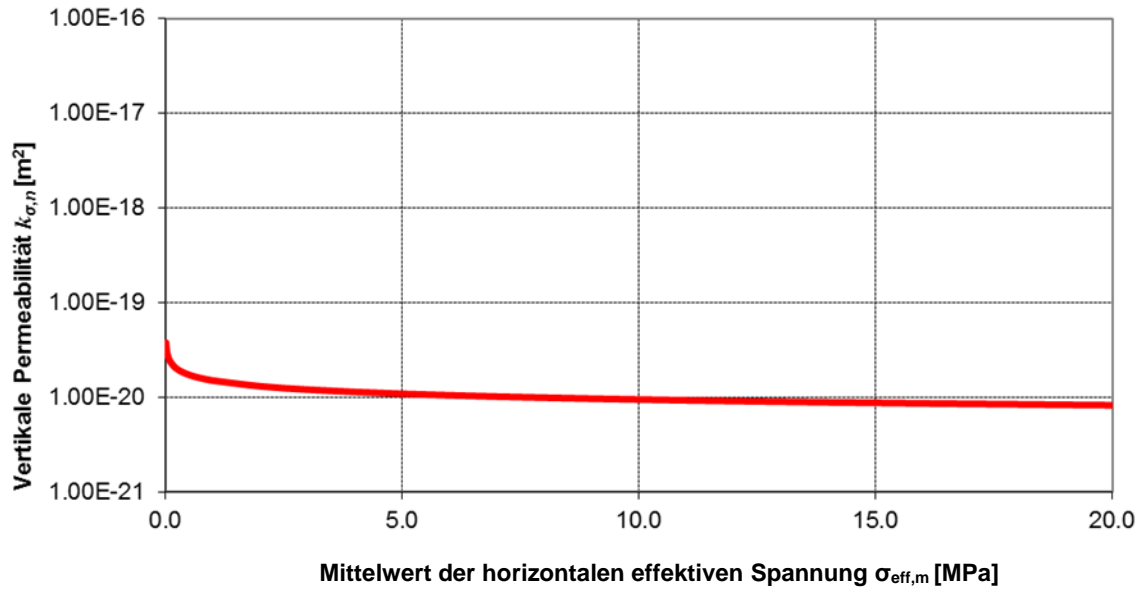


Abb. 3.2: Abhängigkeit zwischen dem Mittelwert der horizontalen effektiven Spannung $\sigma_{eff,m}$ und der vertikalen Permeabilität $k_{\sigma,n}$

3.2 Vom Vektor der plastischen Dehnungen abhängiger Anteil an der Permeabilität

$$k_{\varepsilon,x} = k_{\varepsilon} \cdot (\varepsilon_y^+ + \varepsilon_z^+), \quad k_{\varepsilon,x} \leq k_{\varepsilon,max} \quad (3.5)$$

$$k_{\varepsilon,y} = k_{\varepsilon} \cdot (\varepsilon_x^+ + \varepsilon_z^+), \quad k_{\varepsilon,y} \leq k_{\varepsilon,max} \quad (3.6)$$

$$k_{\varepsilon,z} = k_{\varepsilon} \cdot (\varepsilon_x^+ + \varepsilon_y^+), \quad k_{\varepsilon,z} \leq k_{\varepsilon,max} \quad (3.7)$$

mit $\varepsilon_i^+ = \varepsilon_i^{pl}$ für $\varepsilon_i^{pl} \geq 0$ und $\varepsilon_i^+ = 0$ für $\varepsilon_i^{pl} < 0$

$$k_{\varepsilon} = 1,00E-14 \quad [m^2] \quad \text{Materialparameter (Vymlatil et al. 2012)}$$

$$k_{\varepsilon,max} = 1,00E-16 \quad [m^2] \quad \text{Materialparameter (Vymlatil et al. 2012)}$$

4 Beispiel

4.1 TED-Versuch

Das Stoffmodell wurde auf ein bestehendes numerisches Modell angewendet. Das verwendete Modell modelliert den Erhitzerversuch TED, der von ANDRA im Untertagelabor Meuse/Haute-Marne durchgeführt wurde. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in (Jobmann et al. 2013) zu finden.

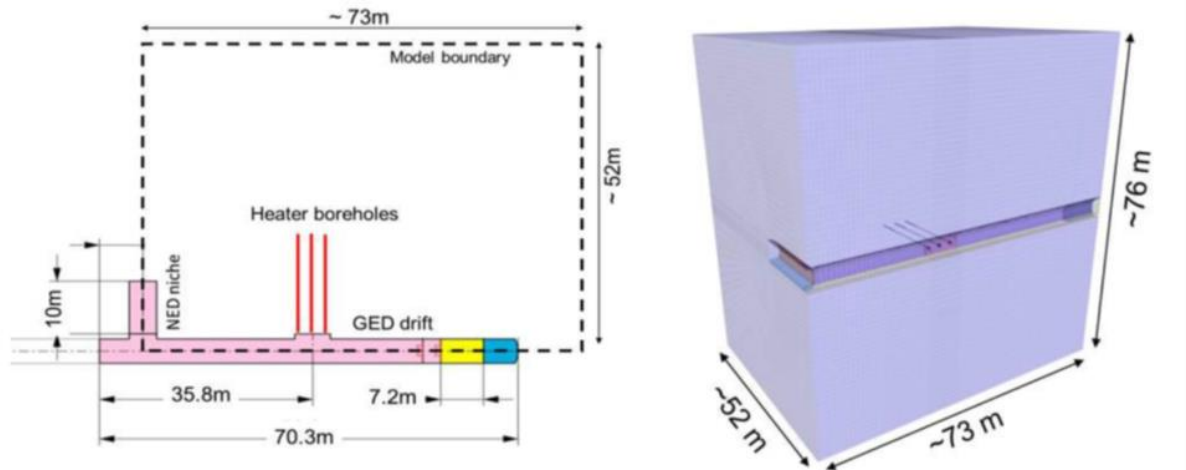


Abb. 4.1: Versuchsstrecke (links) und numerisches Modell (rechts)

Das Ziel der Modellierung des TED-Versuchs war, durch Rückrechnung der Messwerte THM-Parameter anzupassen. Wie in Abb. 4.1 dargestellt, besteht der Erhitzerversuch aus 3 Erhitzerbohrungen. 21 Beobachtungsbohrungen wurden erstellt und mit Messinstrumenten ausgestattet, um das anisotrope THM-Verhalten des Tongesteins zu messen. Es wurden Porenwasserdrücke, Temperaturen und Deformationen gemessen.

Die Erhitzer sind 4 m lang und können eine Heizleistung von 1500 W erzeugen. Der Abstand zwischen den Erhitzern beträgt 2,6 m, um die Geometrie des geplanten Einlagerungsfeldes abzubilden. Der zentrale Erhitzer wurde am 25. Januar 2010 aktiviert. Nach einem Jahr wurden die zwei äußeren Erhitzer aktiviert. Die Heizleistung wurde zu Beginn auf 150 W eingestellt, nach 4 Monaten wurde die Heizleistung auf 300 W, nach weiteren 4 Monaten auf 600 W eingestellt.

Das Stoffmodell wurde auf das numerische Modell des TED-Versuchs angewendet, was zu anderen Permeabilitäten führte und damit Änderungen der berechneten Porendrücke und Spannungsfelder hervorgerufen hatte, im Vergleich zum Originalmodell.

4.2 Permeabilität bedingt durch den lithostatischen Druck

Im ersten Schritt wird die Permeabilität im Gleichgewichtszustand ausgewertet. Zu diesem Zeitpunkt ist der Verschiebungsvektor Null, so dass sich die Permeabilität allein aus dem spannungsabhängigen Anteil berechnet. Die Spannungen sind allein durch den Überlagerungsdruck bedingt.

Im ursprünglichen Modell wurde eine horizontale Permeabilität von $5,1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ verwendet. Aus dem Stoffmodell ergibt sich eine spannungsabhängige Permeabilität zwischen $1,1396 \cdot 10^{-19}$ und $1,2003 \cdot 10^{-19}$, wie in Abb. 4.2 und Abb. 4.3 dargestellt.

Für die vertikale Permeabilität wurden im ursprünglichen Modell $5,1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ angesetzt. Aus dem Stoffmodell ergibt sich eine spannungsabhängige Permeabilität zwischen $9,4654 \cdot 10^{-21}$ und $9,5605 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ wie in Abb. 4.4 dargestellt.

Das Stoffmodell berechnet in etwa doppelt so hohe Permeabilitäten, im Vergleich zur ursprünglichen Parametrisierung.

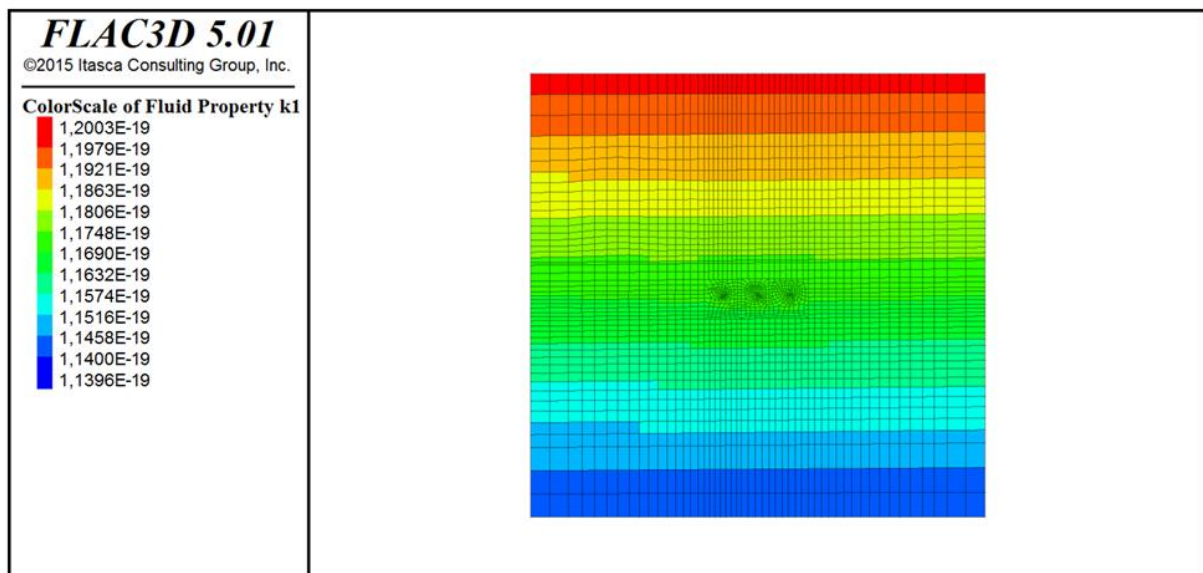


Abb. 4.2: Mit dem Stoffmodell berechnete spannungsabhängige Permeabilität in x-Richtung (k_1 [m^2])

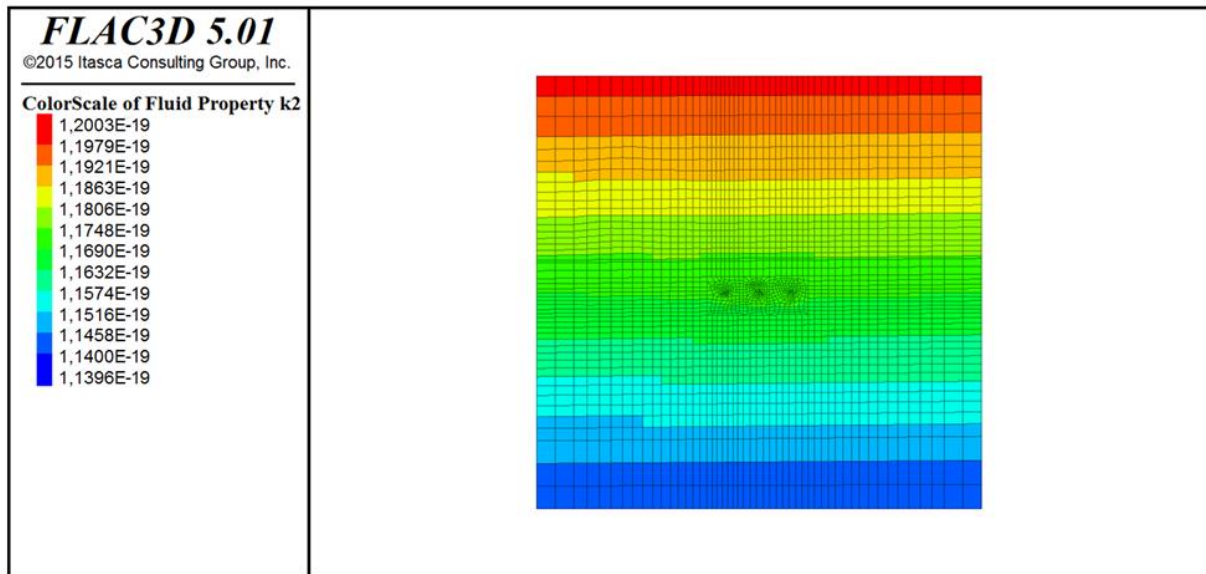


Abb. 4.3: Mit dem Stoffmodell berechnete spannungsabhängige Permeabilität in y-Richtung (k_2 [m²])

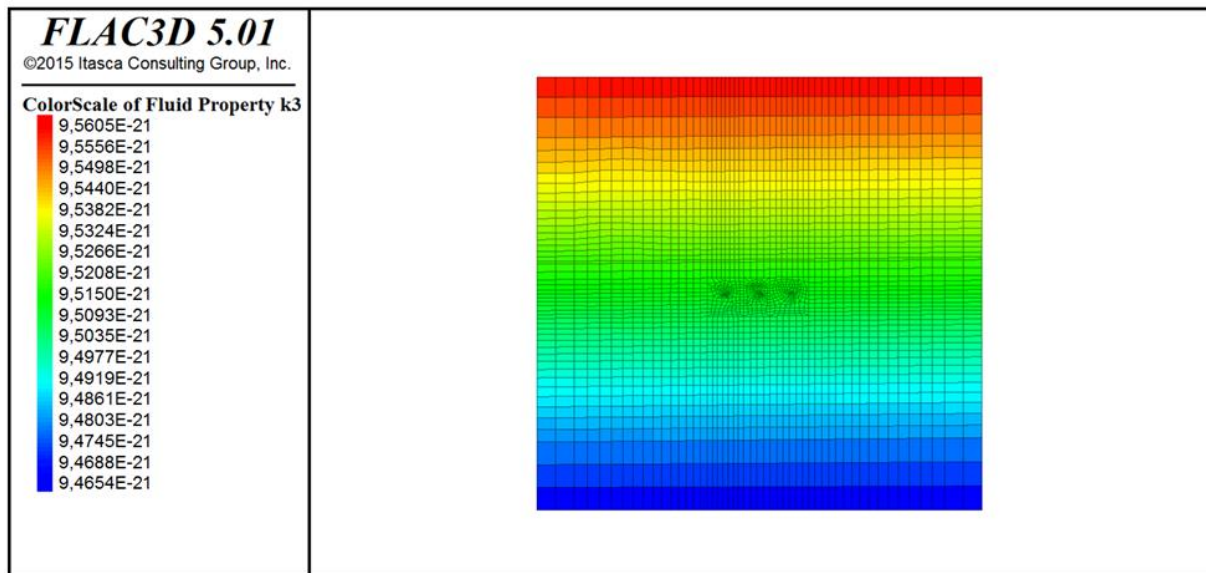


Abb. 4.4: Mit dem Stoffmodell berechnete spannungsabhängige Permeabilität in z-Richtung (k_3 [m²])

4.3 Permeabilität zu verschiedenen Zeitpunkten

Die Abb. 4.6 zeigt die Permeabilität zu den Zeitpunkten 149, 348 und 480 Tage nach Beginn der Erhitzerphase.

Im Berechnungsverlauf wurde die Strecke aufgefahren, die Bohrlöcher für die Erhitzerbohrungen gebohrt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ d wurde Erhitzer 1 – der mittlere Erhitzer – eingeschaltet. Erhitzer 2 und Erhitzer 3, die links und rechts von Erhitzer 1 liegen, wurden zum Zeitpunkt $t = 400$ d eingeschaltet.

Die Abbildungen zeigen den Teil der Strecke, der genau in der Mitte von Erhitzerbohrung 1 beginnt, und Erhitzerbohrung 3 umfasst. Die Erhitzer befinden sich in ca. 14 m Teufe vom Streckenstoß aus gemessen.

Ganz grob sind die Permeabilitäten im Gebirge im Bereich des Erhitzers geringer im Vergleich zum streckennahen Gebirgsbereich. Im Bereich der Strecke ist das Gebirge entlastet, während im Bereich des Erhitzers eine große Beanspruchung vorliegt.

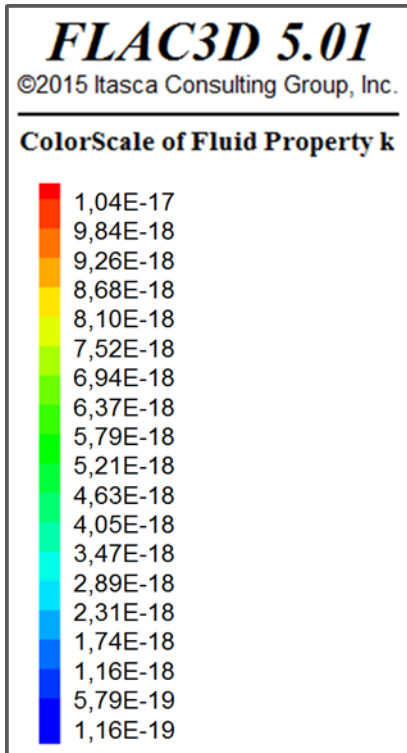


Abb. 4.5: Legende für Abb. 4.6, Permeabilität k in m²

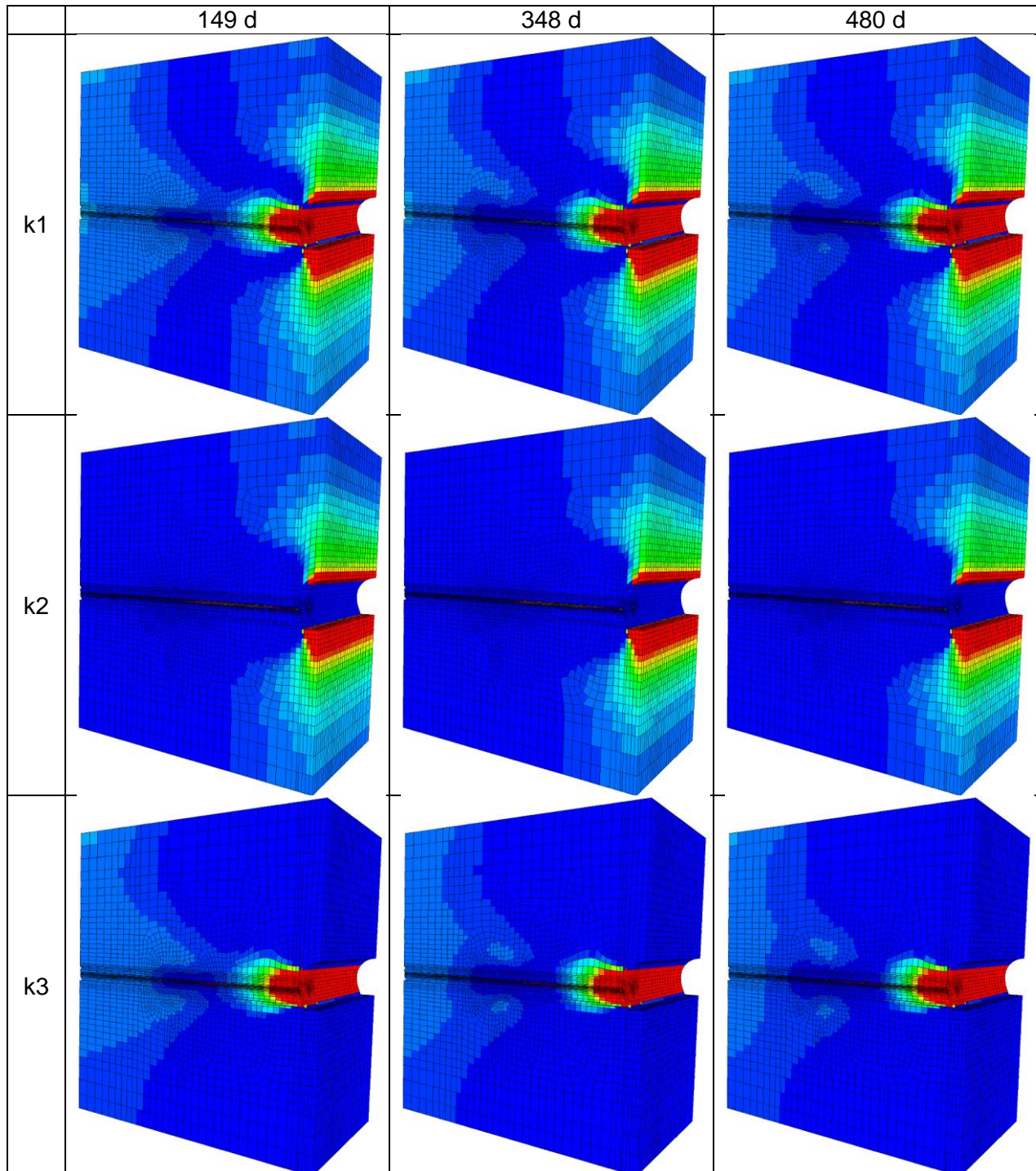


Abb. 4.6: Permeabilität in x-Richtung (k1), y-Richtung (k2) und z-Richtung (k3) zu den Zeitpunkten $t = 149, 348$ und 480 d [m^2], Legende siehe Abb. 4.5

4.4 Spannungsabhängige Permeabilität im in zwei ausgewählten Zonen

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die effektiven Spannungen und die spannungsabhängigen Permeabilitäten [m^2], die im Laufe der Berechnung im Zeitraum von $t = 0$ bis $t = 149$ d sowie im Zeitraum von $t = 149$ bis 426 d in zwei verschiedenen Zonen errechnet wurden. Die Diagramme korrelieren mit Abb. 3.1 bzw. Abb. 3.2. Damit zeigen die Diagramme, dass die spannungsabhängige Permeabilität vom Stoffmodell richtig berechnet wird.

Ausgewertet wurde Zone 131315, die im Wirtsgestein ca. 10 cm über Erhitzer 1 liegt. Des Weiteren wurde Zone 70892 ausgewertet, die im Wirtsgestein, ca. 10 m über Erhitzer 1 liegt, in Nähe der Strecke.

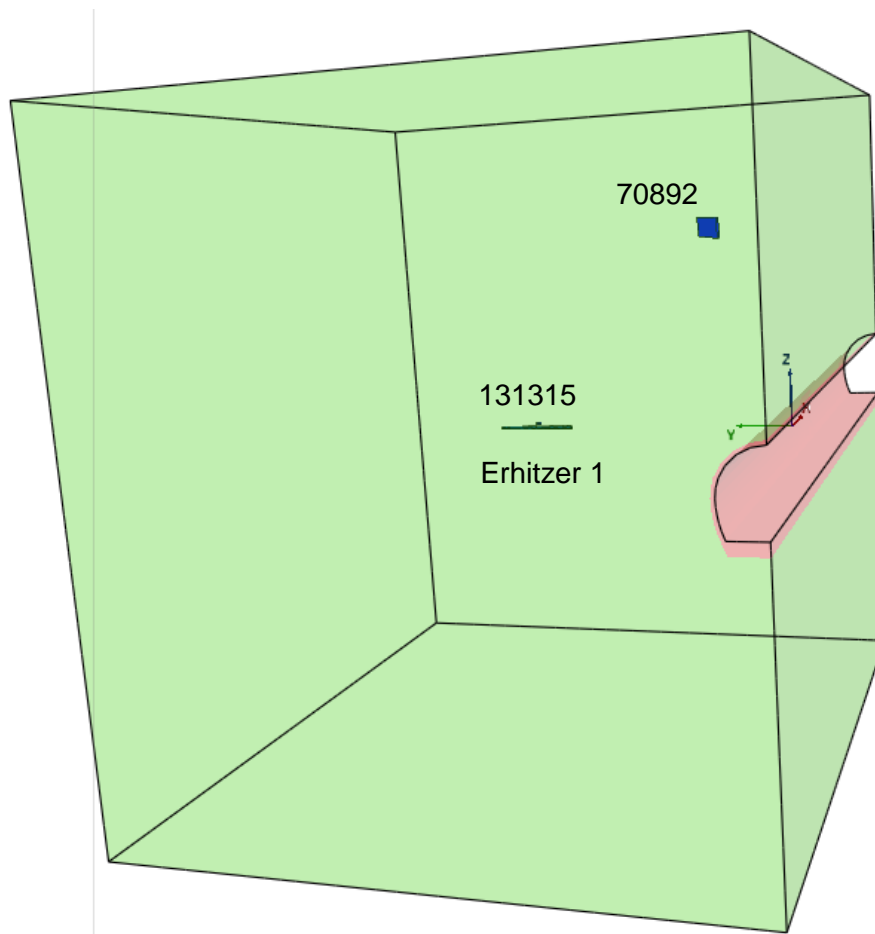


Abb. 4.7: Lage der zwei ausgewählten Zonen im Modellgebiet

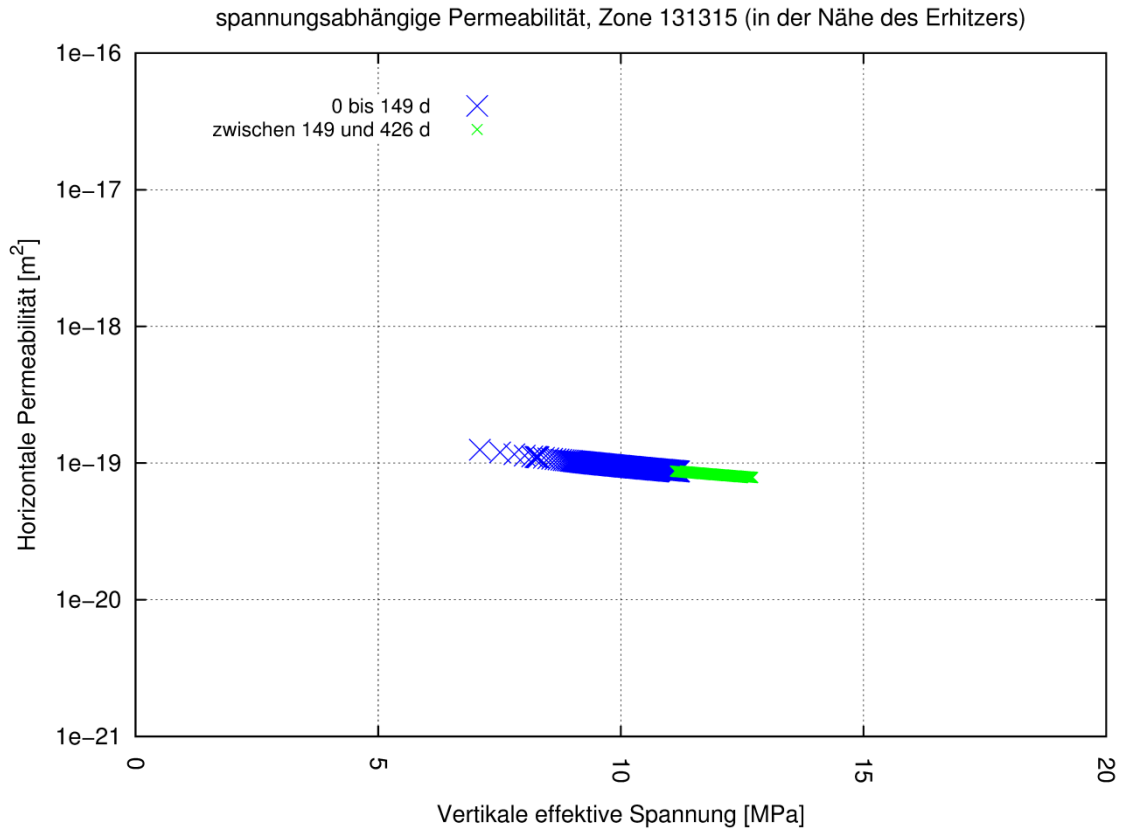


Abb. 4.8: Spannungsabhängige horizontale Permeabilität [m²] in Erhitzernähe (Zone 131315)

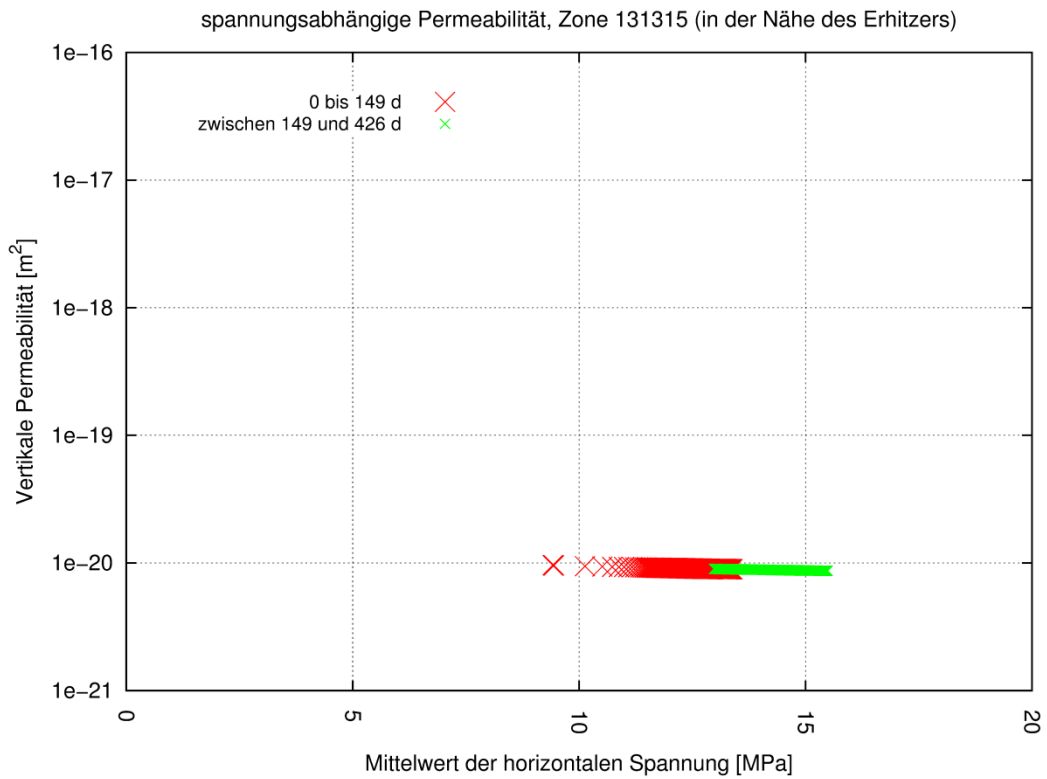


Abb. 4.9: Spannungsabhängige vertikale Permeabilität [m²] in Erhitzernähe (Zone 131315)

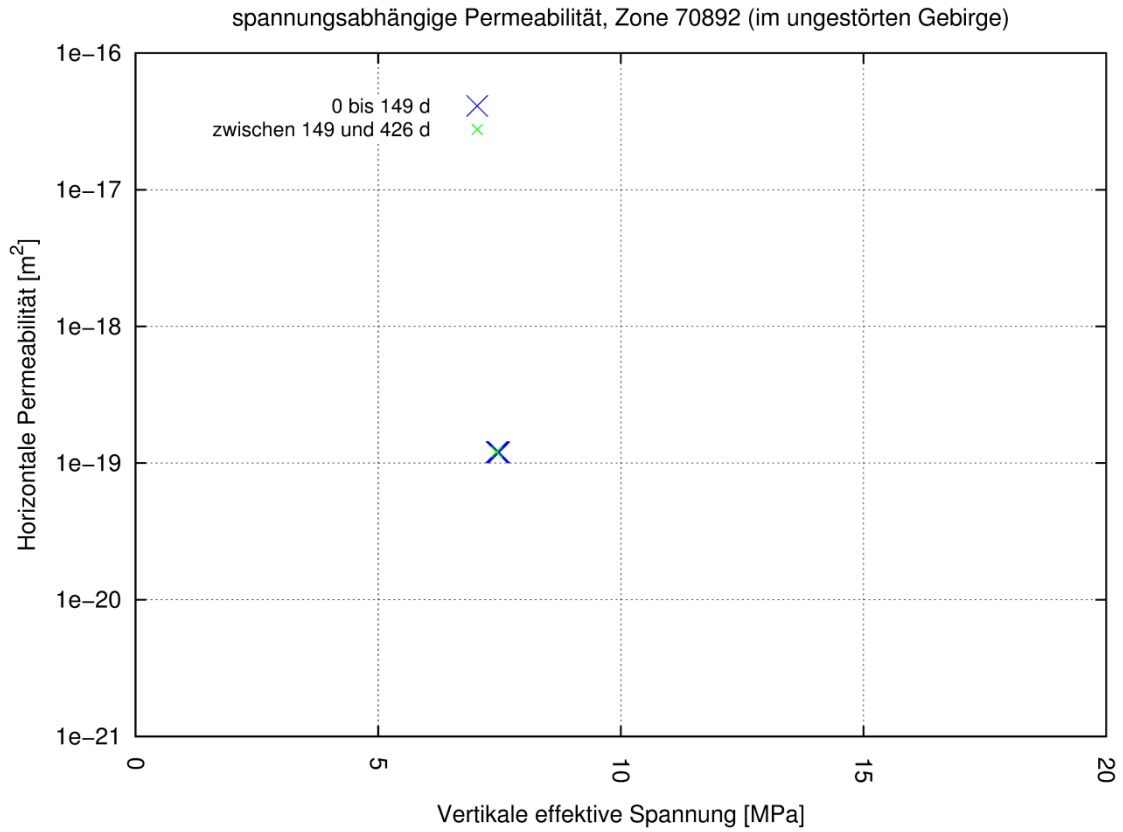


Abb. 4.10: Spannungsabhängige horizontale Permeabilität [m²] im ungestörten Gebirge (Zone 70892)

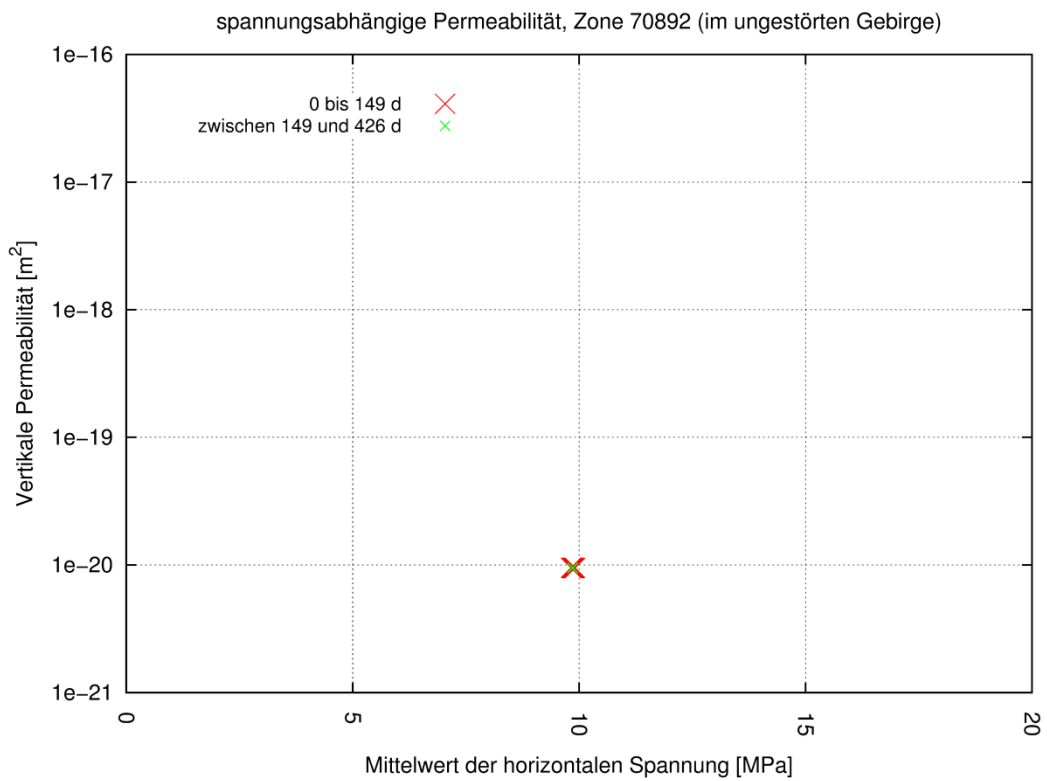


Abb. 4.11: Spannungsabhängige vertikale Permeabilität [m²] im ungestörten Gebirge (Zone 70892)

4.5 Spannungs- und dehnungsabhängige Anteile der Permeabilität

Hier werden die spannungs- und dehnungsabhängigen Anteile der Permeabilität zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Die Darstellungen korrespondieren zu den Darstellungen in Kapitel 4.3, die die entsprechenden Permeabilitäten zu denselben Zeitpunkten beinhalten. Die dehnungsabhängigen Anteile der Permeabilität liegen in der Größenordnung von 10^{-18} bzw. 10^{-17} m², während die spannungsabhängigen Anteile zwischen 10^{-21} und 10^{-19} liegen. Die spannungsabhängigen Anteile an der Permeabilität sind damit mindestens eine Größenordnung kleiner als die dehnungsabhängigen Anteile.

4.5.1 Spannungsabhängige Anteile

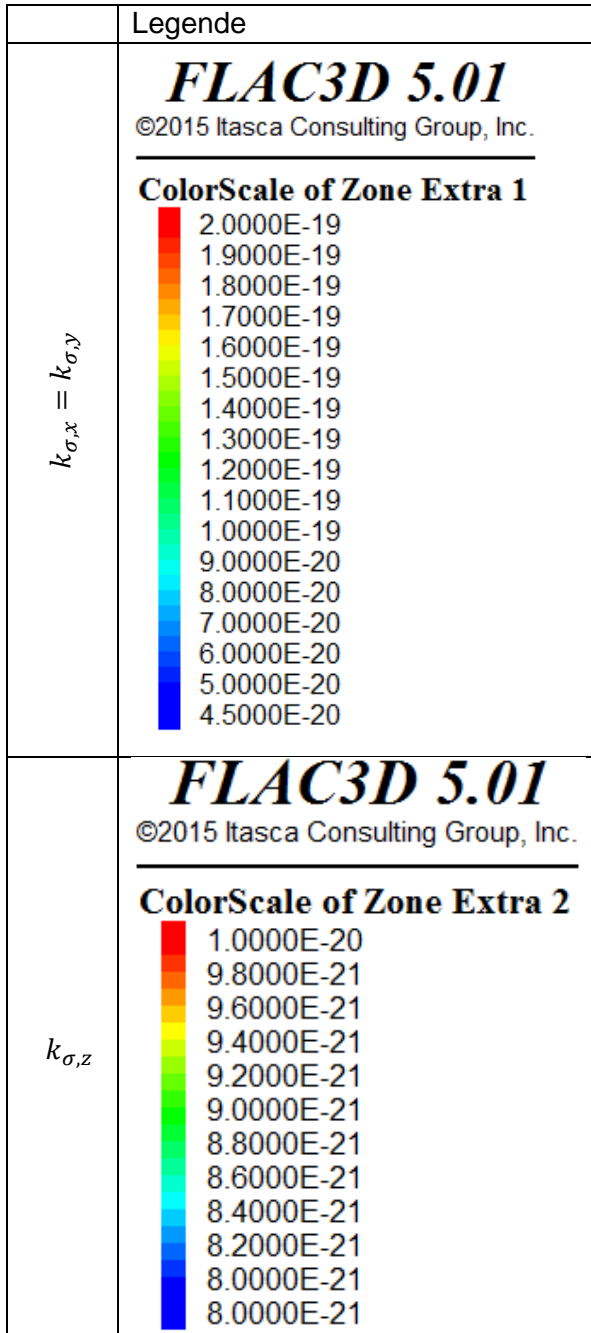


Abb. 4.12: Legende für Abb. 4.13: Spannungsbedingter Anteil an der Permeabilität [m²]

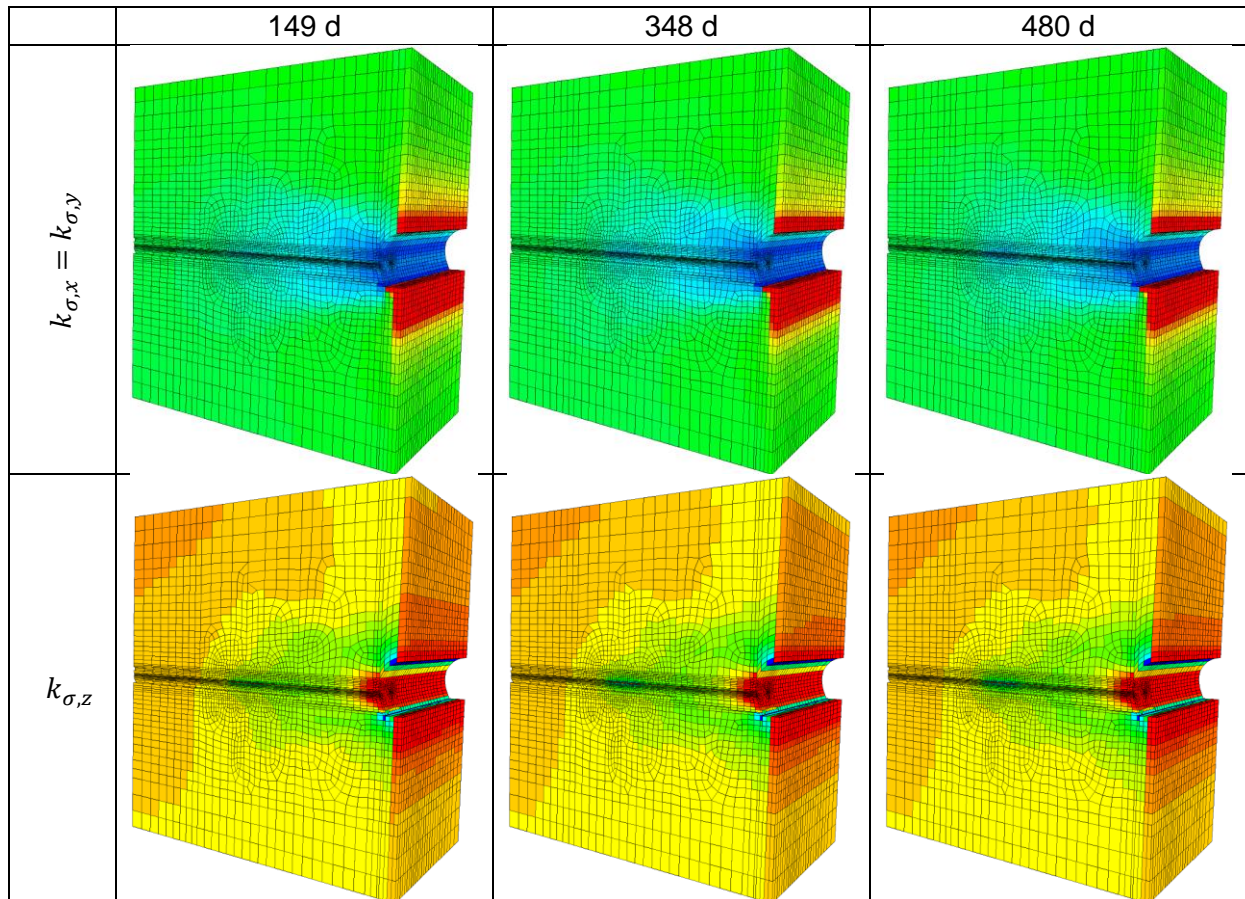


Abb. 4.13: Spannungsbedingter Anteil an der Permeabilität [m²]

4.5.2 Dehnungsabhängige Anteile

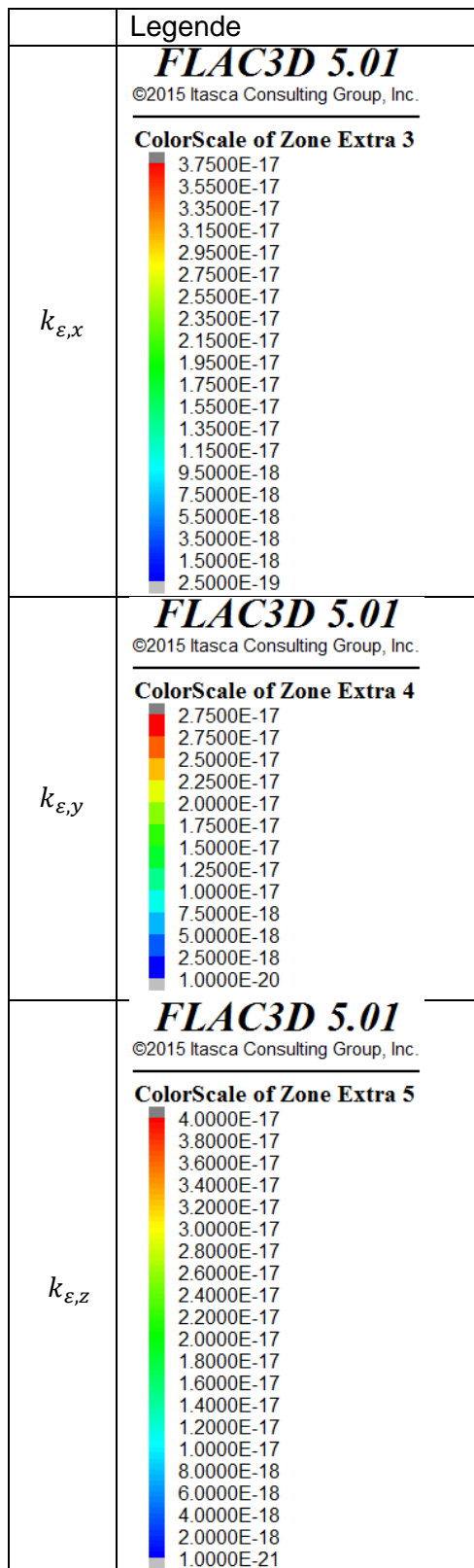


Abb. 4.14: Legende für Abb. 4.15: Dehnungsabhängiger Anteil an der Permeabilität [m²]

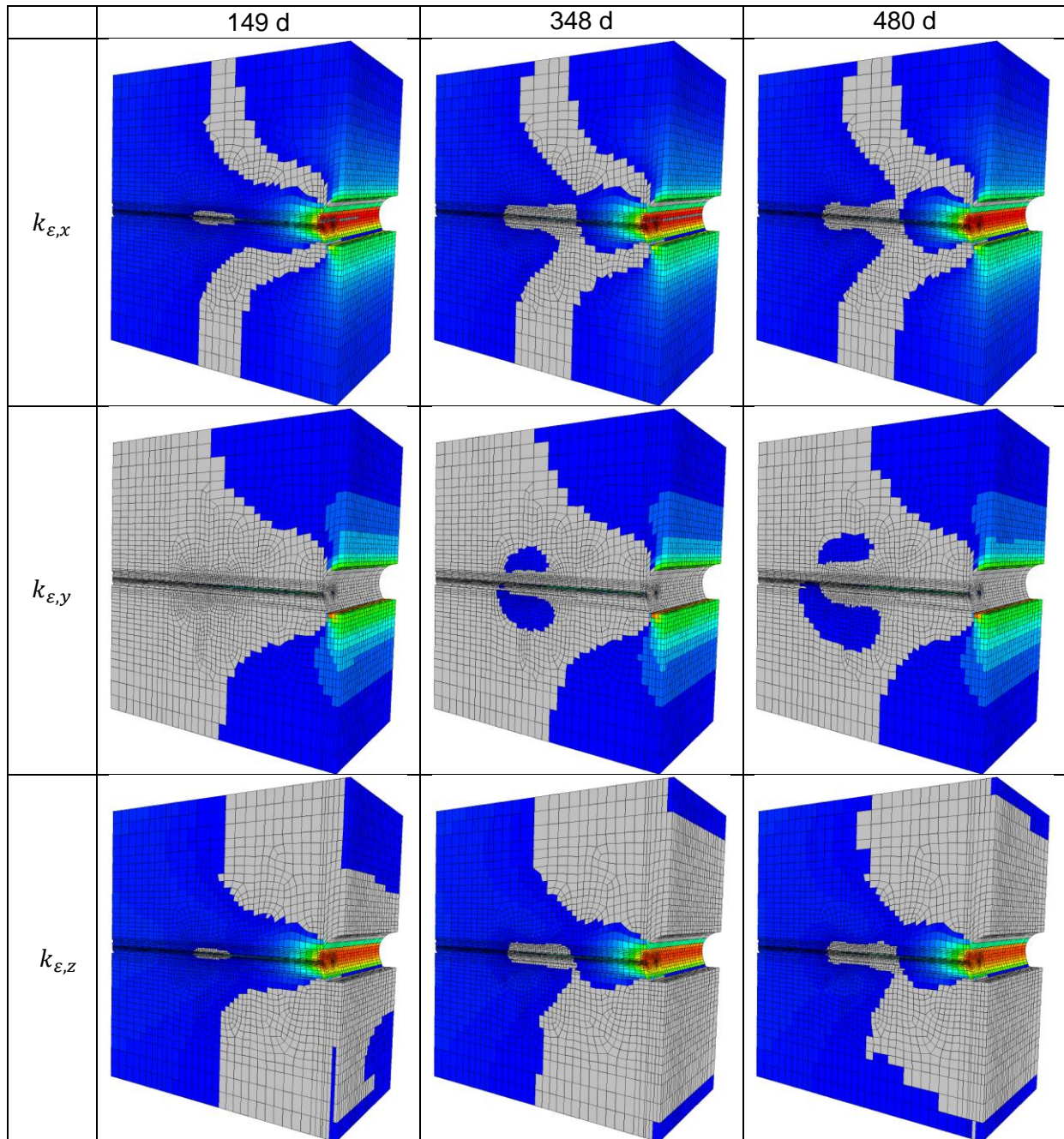


Abb. 4.15: Dehnungsabhängiger Anteil an der Permeabilität [m²]

4.6 Zeitliche Entwicklung der Spannungen und Dehnungen und der dazugehörigen Permeabilitäten

In den beiden nachfolgenden Abbildungen ist die zeitliche Entwicklung der Spannungen und Dehnungen und der dazugehörigen Permeabilitäten sowie der Gesamtpermeabilität und der Porendrucks in Zone 131315 und Zone 70892 dargestellt. Die Zone 131315 befindet sich ca. ca. 10 cm über Erhitze 1. Zone 70892 liegt ca. 10 m über Erhitze 1 in Nähe der Strecke. Die Lage der ausgewerteten Zonen ist in Abb. 4.7 dargestellt.

Es ist zu sehen, dass der Porendruck, die Spannung und die Permeabilität in den Zonen korrelieren. Die dehnungsabhängige Permeabilität ist um eine Größenordnung höher im Vergleich zur spannungsabhängigen Permeabilität.

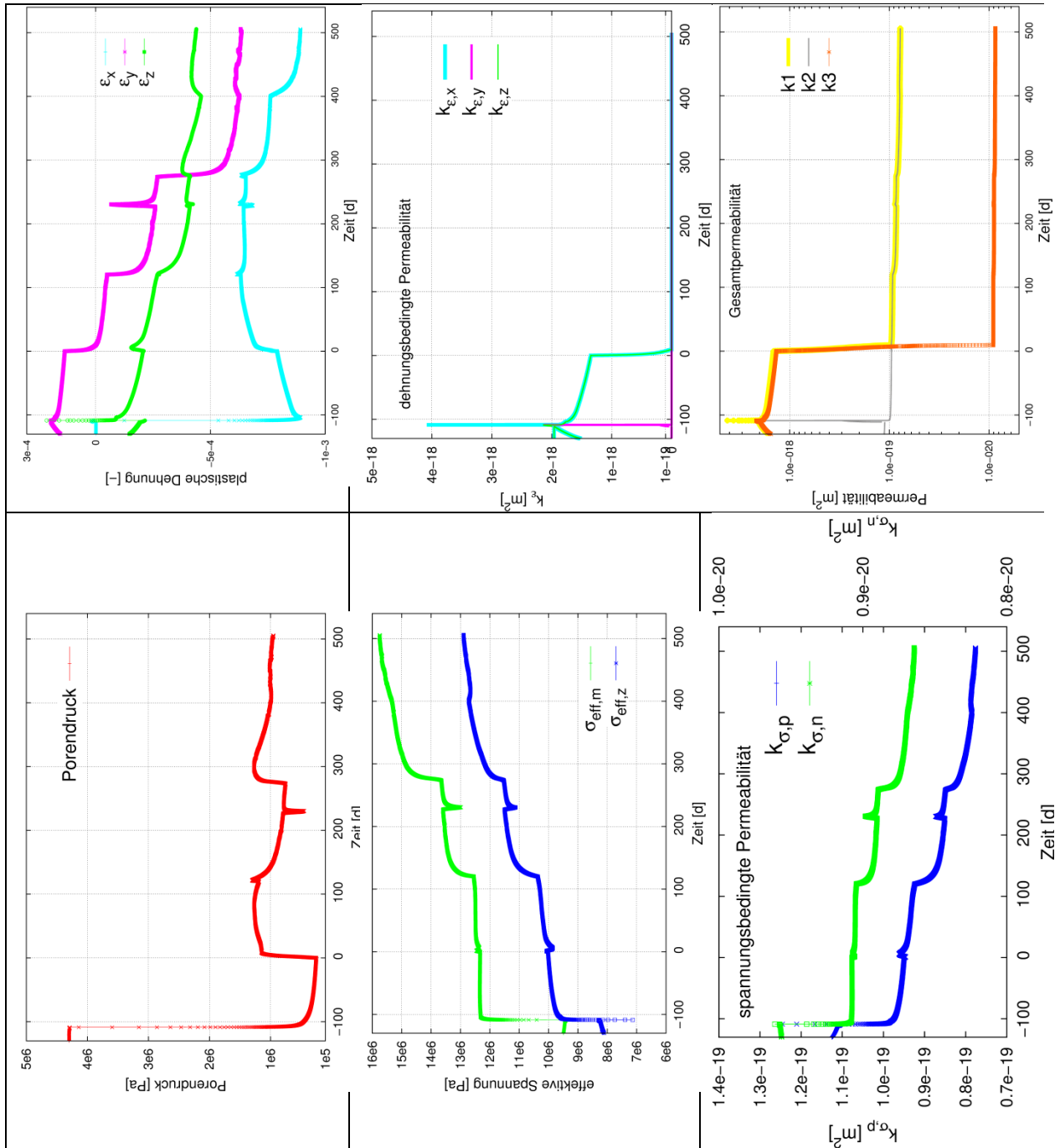


Abb. 4.16: Zeitliche Entwicklung von Spannung, Dehnung, Permeabilität und Porendruck in Zone 131315

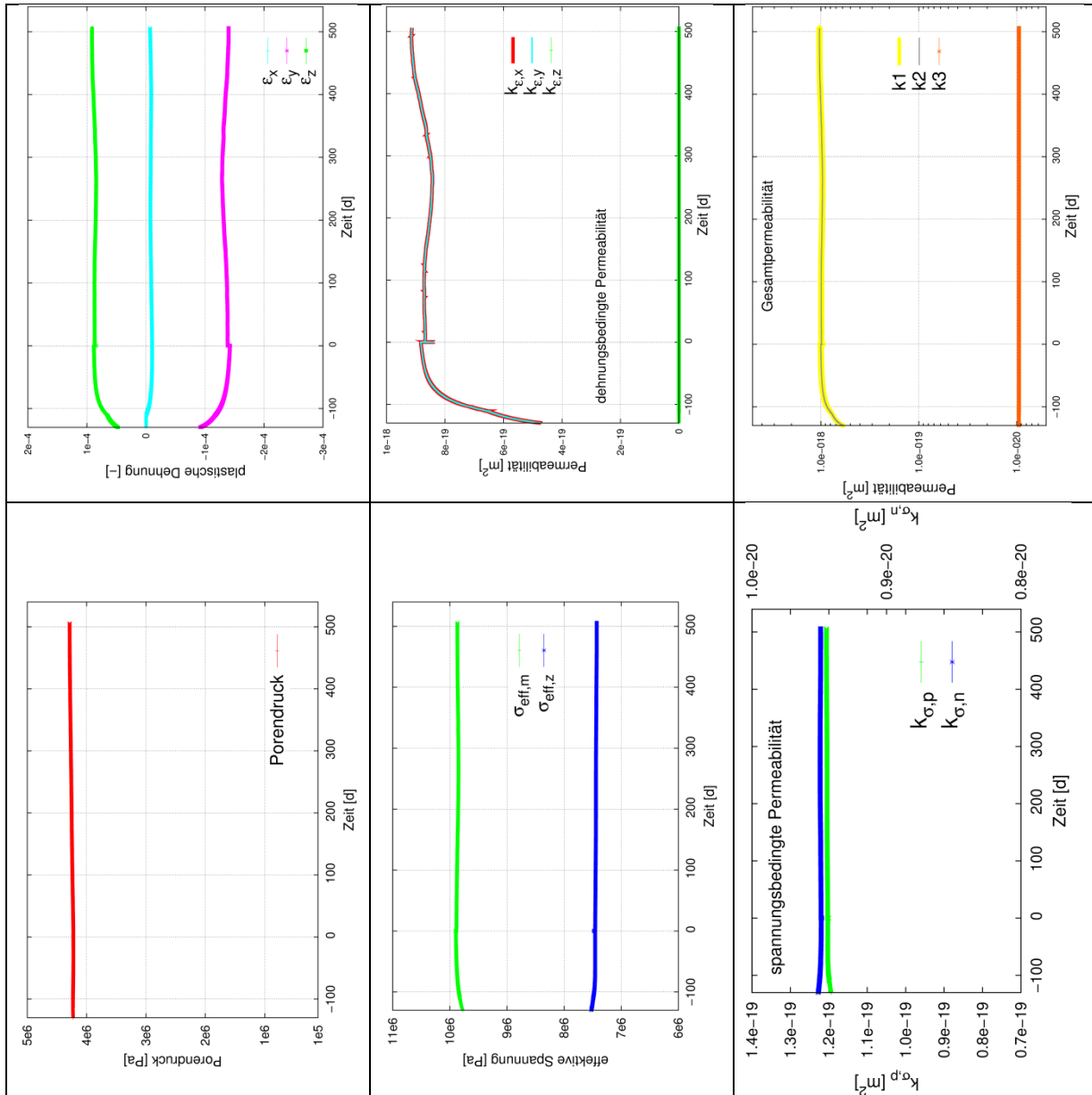


Abb. 4.17: Zeitliche Entwicklung von Spannung, Dehnung, Permeabilität und Porendruck in Zone 70892

5 Zusammenfassung

Das Stoffmodell „Permeabilität abhängig vom Spannungszustand und dem Vektor der plastischen Dehnungen“ wurde als Fish-Routine für das Programm FLAC3D 5.01 (Itasca 2014) geschrieben. Das Stoffmodell setzt die in (Vymlatil et al. 2012) formulierte Abhängigkeit der Permeabilität vom Spannungszustand und dem Vektor der plastischen Dehnungen um.

Anhand eines Beispiels wurde die Funktionsfähigkeit der Fish-Routine überprüft. Das Beispiel wurde durch verschiedene Flächenplots sowie Zeitkurven ausgewertet um die Berechnung der Permeabilität abhängig vom Spannungszustand und dem Vektor der plastischen Dehnungen zu veranschaulichen.

Literaturverzeichnis

Itasca (2014). FLAC Handbücher. Minnesota, USA.

Jobmann, M., Breustedt, M., Li, S., Polster, M., & Schirmer, S. (2013). Investigations on THM effects in buffer, EDZ and argillaceous host rock. Final Report. FKZ 02E10086, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.

Vymlatil, D.P., Schlegel, R. (2012). Parameteridentifikation für thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Berechnungen eines Erhitzerversuches, Technischer Bericht, Dok.-Nr.: K11-DBE-02_TB1_REV_1.doc. 2012.

Anhang (Programmroutine)

Routine perm.fis

```

;-----
; WICHTIG:
;
;-----
; Begriffe:
; Berechnungsdatei: die run-Datei die ein HM oder THM-Modell enthaelt,
;                   in der die Fish-Routine perm.fis aufgerufen wird.
; perm.fis: eine Fish-Routine, die die Permeabilitaet abhaengig vom
;           Spannungszustand und vom Vektor der plastischen Dehnungen
;           berechnet
;-----
; -> Zugrunde liegt die Annahme eines Tongesteins, der eine horizontale
;     Schichtung aufweist. Das heisst, dass die Schichtflaechen horizontal
;     verlaufen und parallel zur x-y-Ebene des Modells liegen. Die
;     Normale zu den Schichtflaechen entspricht der z-Richtung im Modell.
; -> perm.fis zu dem Zeitpunkt aufrufen, zu dem ein mechanisches,
;     hydraulisches und thermisches Gleichgewicht vorliegt. perm.fis
;     macht zu diesem Zeitpunkt folgendes:
;     (1) Dehnungstensor auf Null setzen (ini xd 0 yd 0 zd 0)
;     (2) gp-Geschwindigkeiten auf Null setzen
;         (ini xvel 0 yvel 0 zvel 0)
;         - das dient nur der numerischen Stabilitaet
; -> perm.fis deckt NICHT den Fall ab, dass der Dehnungstensor
;     im Laufe der Berechnung auf Null gesetzt wird.
; -> AUFPASSEN: fuer Nullzonen kann waehrend der gesamten Berechnung
;     keine "alte Temperatur" bzw. "elastische Dehnung" initialisiert
;     werden. BZW: perm.fis wird nur auf die Zonen angewendet, die
;     zum Zeitpunkt des Aufrufs der Routine NICHT NULL waren.
; -> perm.fis deckt NICHT den Fall ab, dass nach dem ersten Aufruf
;     der Routine neue Zonen hinzukommen. fuer neu hinzugekommene Zonen
;     wird die "alte Temperatur" (z_var_extra_temp_ini) bzw. die
;     "elastische Dehnung" nicht initialisiert.
; -> perm.fis perm.fis funktioniert fuer Kelvin und Grad Celsius.
; -> Das Stoffmodell ist dem Technischen Bericht "Parameter-
;     identifikation fuer thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte
;     Berechnungen eines Erhitzerversuchs"
;     Dok.Nr.: K11-DBE-02_RB1_REV_1.DOC entnommen. Die Verweise in den
;     Kommentaren (auf Tabellen bzw. Formeln) beziehen sich auf diesen
;     technischen Bericht.
;-----
; VORAB:
; -> Die Anzahl der in der Berechnungsdatei verwendeten zextra-Variablen
;     in die Variable zextra_reserved eingeben.
; -> In der Berechnungsdatei die Variable abfrage_biot auf 1
;     setzen, wenn "set fluid biot on" gesetzt wird und auf 0 bei
;     "set fluid biot off"
;     set fluid biot on -> set @abfrage_biot 1
;     set fluid biot off -> set @abfrage_biot 0
; -> Variablen in der Berechnungsdatei und in der perm.fis abgleichen:
;     erdbesch      = 9.81                ; Erdbeschleunigung m/s^2
;     zeit_faktor   = 24 * 60 * 60        ; Sekunden

```

```

; wasser_visk = 1.001e-003 ; Pa * s
; wasser_dichte = 1000.0 ; kg/m^3
;
~~~~~
;
~~~~~
;
;
~~~~~
; Dehnungstensor und gp-Geschwindigkeiten auf Null setzen
;
ini xvel 0 yvel 0 zvel 0
ini xd 0 yd 0 zd 0

; ~~~~~
; Initialisierung
; ~~~~~
def set_ini
;
; zextra_reserved = 0 ; hoechste Nummer
der bereits genutzten z_extra (aus der Berechnungsdatei, in der perm.fis aufgerufen wird,
uebernehmen!!)
ii_extra = 1
;
z_var_extra_k_sigma_x_y = zextra_reserved + ii_extra ; span-
nungsabhaengige Permeabilitaet in den horizontalen Richtungen x, y (parallel zur bedding
plane)
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_k_sigma_z = zextra_reserved + ii_extra ; span-
nungsabhaengige Permeabilitaet in der vertikalen Richtungen z (normal zur bedding plane)
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_k_epsilon_x = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_k_epsilon_y = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_k_epsilon_z = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_sxx_eff = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_syy_eff = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_szz_eff = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_temp_ini = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

```

```

z_var_extra_eelxx_ini      = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_eelyy_ini     = zextra_reserved + ii_extra
ii_extra = ii_extra + 1

z_var_extra_eelzz_ini     = zextra_reserved + ii_extra
;
k_0_p      = 6.0E-19
n_p        = 0.8
k_0_n      = 1.5E-20
n_n        = 0.2
k_epsilon  = 1.0E-14
k_epsilon_max = 1.0E-16
sigma_0    = 1E6
;
p_z = zone_head
loop while p_z # null
    z_extra(p_z,z_var_extra_temp_ini) = -9999          ; spaeter wird die
Vergleichstemperatur (z_var_extra_temp_ini) nur geschrieben, wenn z_var_extra_temp_ini =
-9999 ist
    p_z = z_next(p_z)
end_loop
end
@set_ini
;
; ~~~~~
; Initialisierung des Bezugssystems, Zonentemperatur und die
; potentielle schwerkraftbedingte elastische Dehnung
; ~~~~~
def set_val_ini
    p_z = zone_head
    loop while p_z # null
        if z_thmodel(p_z) # 'th_null' then
            if z_extra(p_z,z_var_extra_temp_ini) = -9999 then          ; bedeutet, dass fuer diese
Zone noch keine "alte Temperatur" bzw. "alte elastische Dehnung" initialisiert wurde
                ; --- Temperatur -----
                z_extra(p_z,z_var_extra_temp_ini) = z_temp(p_z)
                ;
                ; --- Effektivspannung -----
                z_extra(p_z,z_var_extra_sxx_eff)  = (z_sxx(p_z) * (-1)) - z_pp(p_z)
                ; Berechnung der effektiven Spannungen
                z_extra(p_z,z_var_extra_syy_eff)  = (z_syy(p_z) * (-1)) - z_pp(p_z)
                z_extra(p_z,z_var_extra_szz_eff)  = (z_szz(p_z) * (-1)) - z_pp(p_z)
                ;
                ; --- Elastische Konstanten -----
                k_modul = z_prop(p_z,'bulk')
                g_modul = z_prop(p_z,'shear')
                e_modul = 9.*k_modul*g_modul/(3.*k_modul+g_modul)
                poisson = (3.*k_modul-2.*g_modul)/(3.*k_modul+g_modul)/2.
                ;
                ; --- Elastischer Dehnungsanteil -----
                z_extra(p_z,z_var_extra_eelxx_ini) = (z_extra(p_z,z_var_extra_sxx_eff)-
poisson*(z_extra(p_z,z_var_extra_syy_eff)+z_extra(p_z,z_var_extra_szz_eff)))/e_modul

```

```

      z_extra(p_z,z_var_extra_eelyy_ini) = (z_extra(p_z,z_var_extra_syy_eff)-
      poisson*(z_extra(p_z,z_var_extra_szz_eff)+z_extra(p_z,z_var_extra_sxx_eff)))/e_modul
      z_extra(p_z,z_var_extra_eelzz_ini) = (z_extra(p_z,z_var_extra_szz_eff)-
      poisson*(z_extra(p_z,z_var_extra_sxx_eff)+z_extra(p_z,z_var_extra_syy_eff)))/e_modul

      end_if
    end_if
    p_z = z_next(p_z)
  end_loop
end
@set_val_ini

; ~~~~~
; Berechnung der Permeabilitaet, spannungs- und dehnungsabhaengig
; ~~~~~
def k_sigma
;
anzahl_sigma = 0
p_z = zone_head
loop while p_z # null
;
  if z_flmodel(p_z) = 'fl_anisotropic' then
    ;
    ; -----
    ; Spannungsabhaengiger Anteil
    ; -----
    biot_coefficient = 1
    if abfrage_biot = 1 then
      biot_coefficient = z_flprop(p_z,'biot_c')
    end_if

    ; *** Effektivspannung
    z_extra(p_z,z_var_extra_sxx_eff) = (z_sxx(p_z) * (-1)) - biot_coefficient * z_pp(p_z)
    ; Berechnung der effek-
    ;
    ; tiven Spannungen
    z_extra(p_z,z_var_extra_syy_eff) = (z_syy(p_z) * (-1)) - biot_coefficient * z_pp(p_z)
    z_extra(p_z,z_var_extra_szz_eff) = (z_szz(p_z) * (-1)) - biot_coefficient * z_pp(p_z)
    ;
    ;
    ; Berechnung der effekti-
    ;
    ; ven Spannungen
    z_extra(p_z,z_var_extra_k_sigma_x_y) = k_0_p
    if z_extra(p_z,z_var_extra_szz_eff) > 0 then

      ; nur bei Druckspannungen, vgl. Abb. 3-24
      z_extra(p_z,z_var_extra_k_sigma_x_y) =
      k_0_p*(z_extra(p_z,z_var_extra_szz_eff)/sigma_0)^((-1)*n_p)
      ; Formel 19

    end_if
    ;
    z_extra(p_z,z_var_extra_k_sigma_z) = k_0_n
    sigma_mittel = (z_extra(p_z,z_var_extra_sxx_eff)+z_extra(p_z,z_var_extra_syy_eff))/2
    if sigma_mittel > 0 then

      ; nur bei Druckspannungen, vgl.

```

Abb. 3-25


```

    if eplyy < 0 then
Bedingung fuer Formel 21, 22 und 33
    eplyy = 0
    end_if
    if eplzz < 0 then
Bedingung fuer Formel 21, 22 und 33
    eplzz = 0
    end_if
    ;
    z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_x) = k_epsilon * (eplyy + eplzz)
Formel 21
    z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_y) = k_epsilon * (eplx + eplzz)
    ; Formel 22
    z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_z) = k_epsilon * (eplx + eplyy)
    ; Formel 23

    ;
    if z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_x) > k_epsilon_max then
    z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_x) = k_epsilon_max
    endif
    ;
    if z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_y) > k_epsilon_max then
    z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_y) = k_epsilon_max
    endif
    ;
    if z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_z) > k_epsilon_max then
    z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_z) = k_epsilon_max
    endif

    ;
; ~~~~~
; Gesamtpermeabilitaet & Umrechnung in FLAC-Permeabilitaet
; ~~~~~
;
perm_k1 = z_extra(p_z,z_var_extra_k_sigma_x_y) +
z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_x) ; Permeabilitaet K [Kubikmeter], Summe
aus spannungs- und dehnungsabhaengiger Permeabilitaet
perm_k2 = z_extra(p_z,z_var_extra_k_sigma_x_y) +
z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_y)
perm_k3 = z_extra(p_z,z_var_extra_k_sigma_z) + z_extra(p_z,z_var_extra_k_epsilon_z)

kf_k1 = (perm_k1 * wasser_dichte * erdbesch) / wasser_visk
; Umrechnung Permeabilitaet K [qm] in Durchlaessigkeit kf [m/s]
kf_k2 = (perm_k2 * wasser_dichte * erdbesch) / wasser_visk
kf_k3 = (perm_k3 * wasser_dichte * erdbesch) / wasser_visk

z_flprop(p_z,'k1') = kf_k1 * zeit_faktor / (wasser_dichte * erdbesch)
; Umrechnung Durchlaessigkeit kf [m/s] in FLAC-spezifischer Durchlaessigkeit bezo-
gen auf den Tag: conventional hydraulic conductivity [m/s] divided by the unit weight of water
(density * gravity) [Pa/m]
z_flprop(p_z,'k2') = kf_k2 * zeit_faktor / (wasser_dichte * erdbesch)
z_flprop(p_z,'k3') = kf_k3 * zeit_faktor / (wasser_dichte * erdbesch)

end_if
;

```

```
    p_z = z_next(p_z)
  end_loop
;
end
@k_sigma

hist @k_sigma
```