

CHRISTA II

# Bewertung zur Integrität der geologischen Barriere im Kristallin

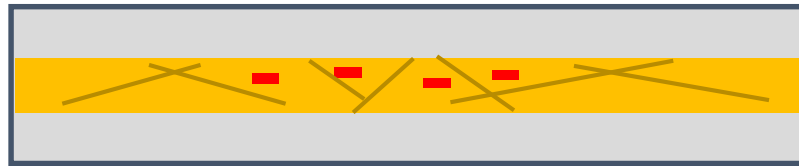
Jan Thiedau, Carlos Guevara, Jobst Maßmann, Sarah Weihmann

15.06.2021

# CHRISTA II: Aufgabenstellung

## Konzeption und beispielhafte Durchführung von Integritätsanalysen für die geologische Barriere

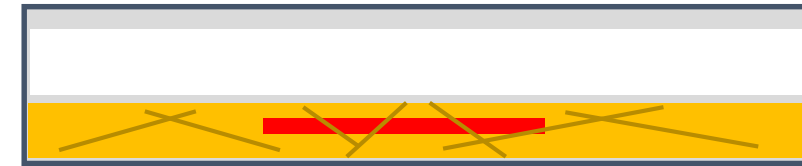
3 Endlagersysteme:



Multiple ewG im Kristallingestein



Überlagernder ewG im Tongestein



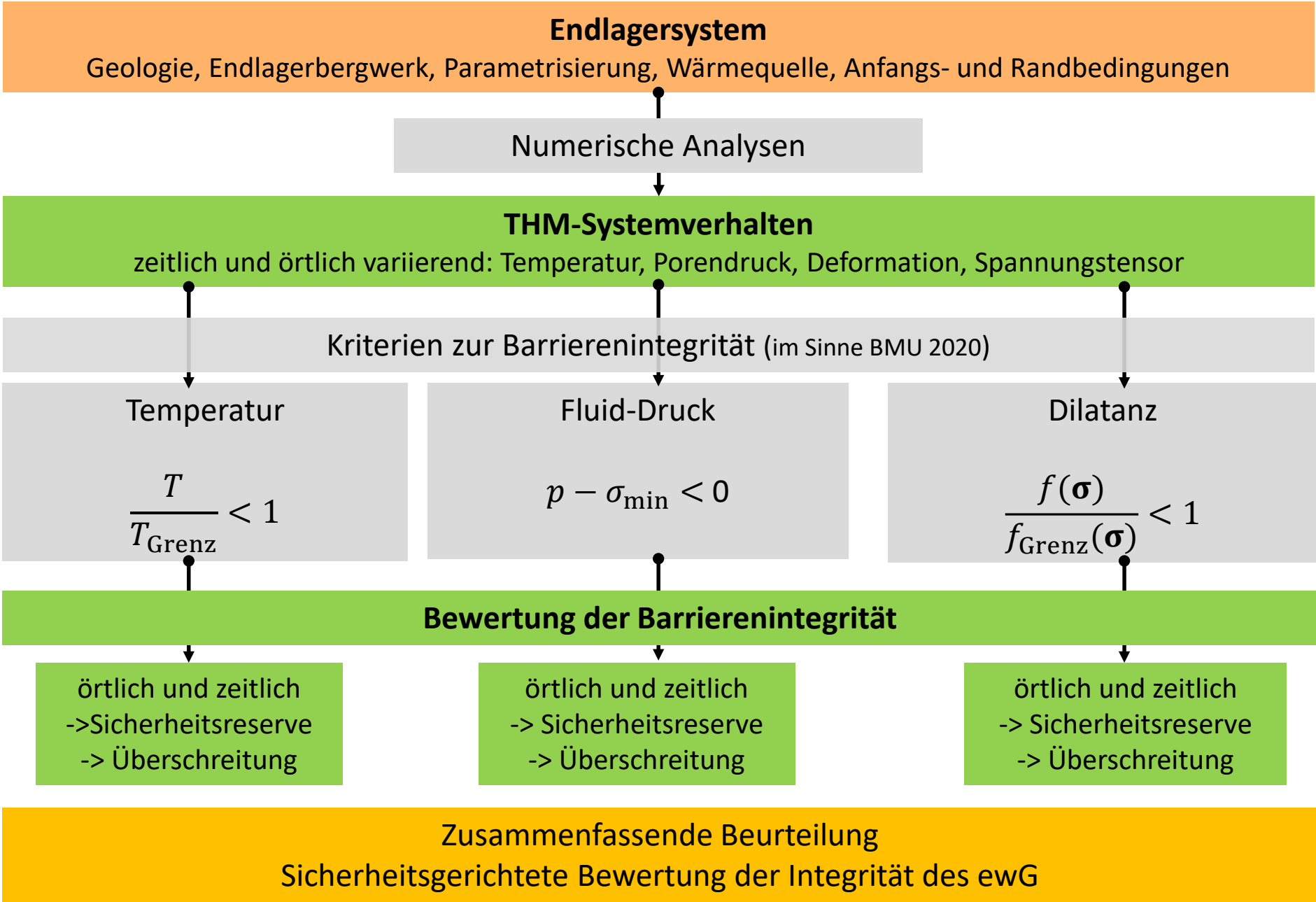
Überlagernder ewG im Salzgestein

### Task 4.1

- Ableitung quantitativer Integritätskriterien

### Task 4.2 / Task 4.3

- Konzeption und Modellbildung zum Nachweis der Integrität der geologischen Barriere im Kristallin
- Exemplarischer Integritätsnachweis („multipler ewG“ und „überlagernder ewG“)
  - Überlagerungseffekte einzelner ewG-Komponenten
  - Auswirkung des Abstands zwischen Wirts- und Barrieregestein



# Ableitung quantitativer Integritätskriterien

Entwurfsstatus

## Temperatur-Kriterium

- BMU 2020: Keine erhebliche Beeinträchtigung der Barrierewirkung durch Temperatureinwirkung
- Literaturanalyse: 150 °C für HMC-Prozesse unproblematisch, biologisch vorteilhaft
- Zunächst orientiert an StandAG, §27 Absatz 4
- Behälteroberfläche unter 100 °C

## Fluiddruck-Kriterium

- BMU 2020: Keine Fluiddrücke, die zur Zunahme von Fluidwegsamkeiten führen
- HM-Kopplung wesentlich, Fluiddrücke implizit in effektiven Spannungen erhalten
- Totale Gebirgsspannungen stets größer als Porendruck

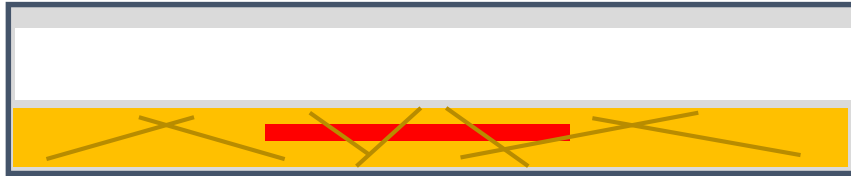
## Dilatanz-Kriterium

- BMU 2020: a) Keine Ausbildung von Fluidwegsamkeiten, b) Dilatanzfestigkeit nicht überschreiten
- a) Keine Entstehung, Fortpflanzung, Öffnung von Rissen,
- b) dilatantes Verhalten geht diesem stets voraus und erscheint abdeckend
- Vorschädigung / Klüftung muss ggf. berücksichtigt werden
- Hoek-Brown als Kriterium auf effektive Spannungen anwenden, Einbeziehung GSI-Index zur Vorschädigung

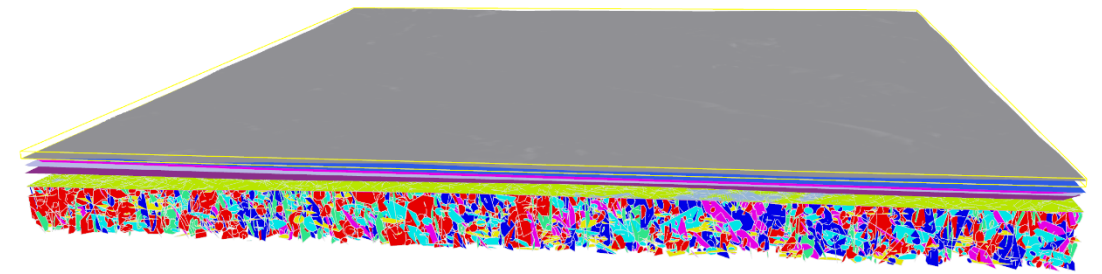
## „Chemie-Kriterium“

- BMU 2020: Keine erhebliche Beeinträchtigung der Barrierewirkung durch geänderte chemischen Verhältnisse
- Vorschlag für einen Bewertungsmaßstab soll im Vorhaben noch erarbeitet werden

# Integritätsanalysen zum überlagernden ewG



- Analyse der Integrität des überlagernden ewGs
- THM-Analysen in Salz- und Tongestein
- Konzepte aus den Vorhaben KOSINA bzw. ANSICHT
- Numerische 2D-Untersuchungen für das Vorhaben RESUS
- Abstand zwischen ewG und Einlagerungsbereich
- Keine Nahfeldprozesse im ewG

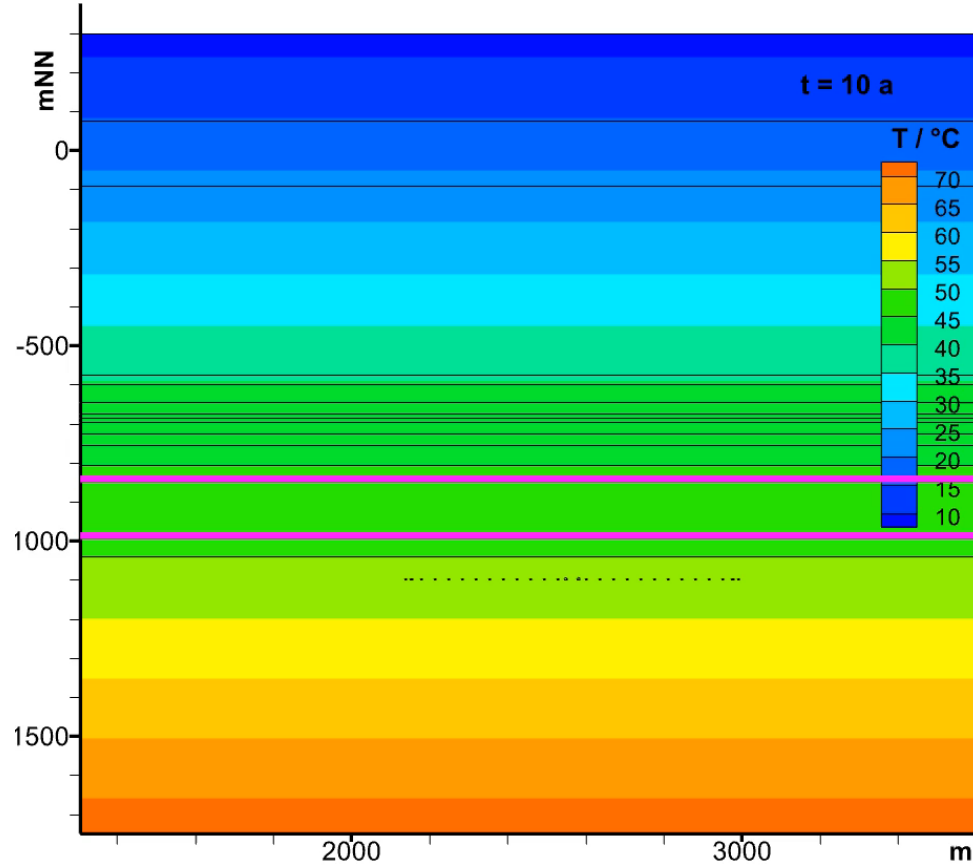


# Integritätsanalysen zum überlagernden ewG

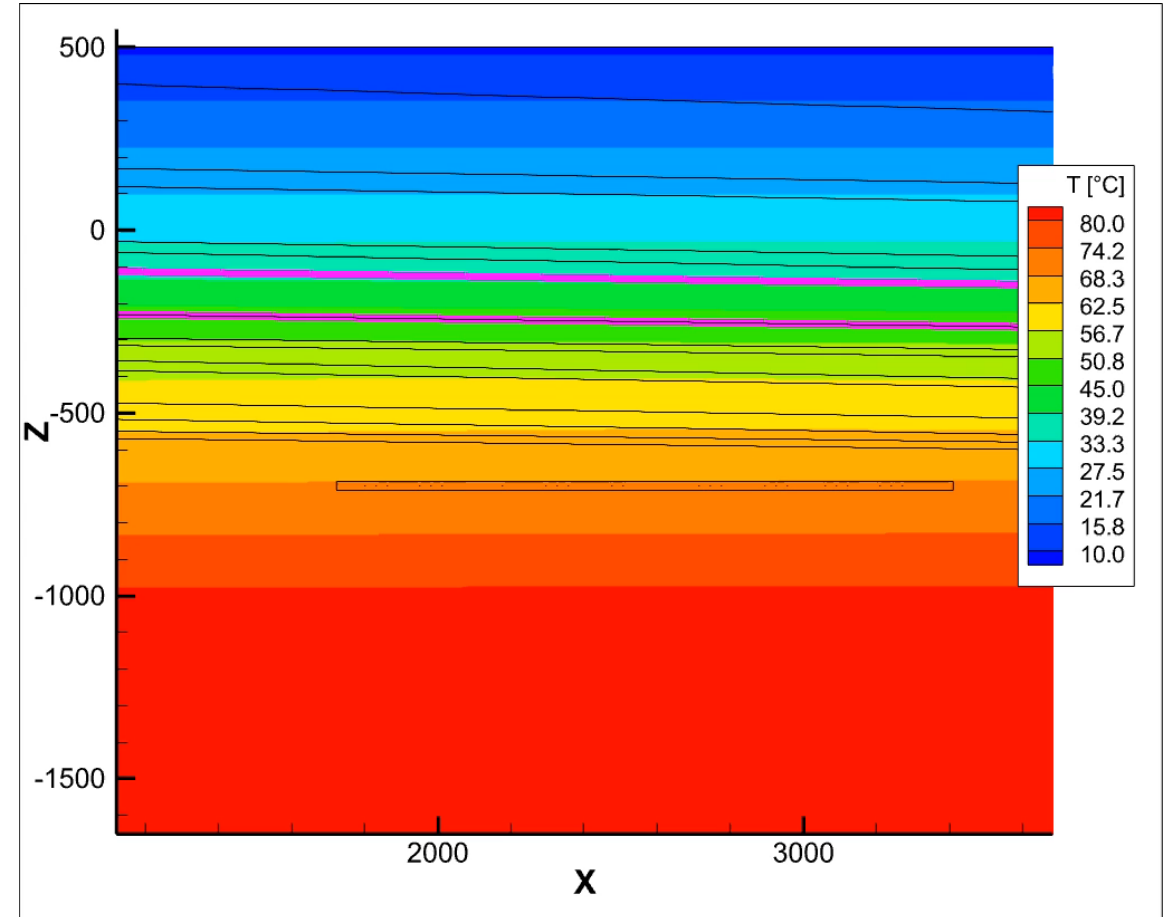
Ergebnisse aus dem Vorhaben Resus:  
Temperaturentwicklung



## Überdeckende Steinsalzformation



## Überdeckende Tonsteinformation

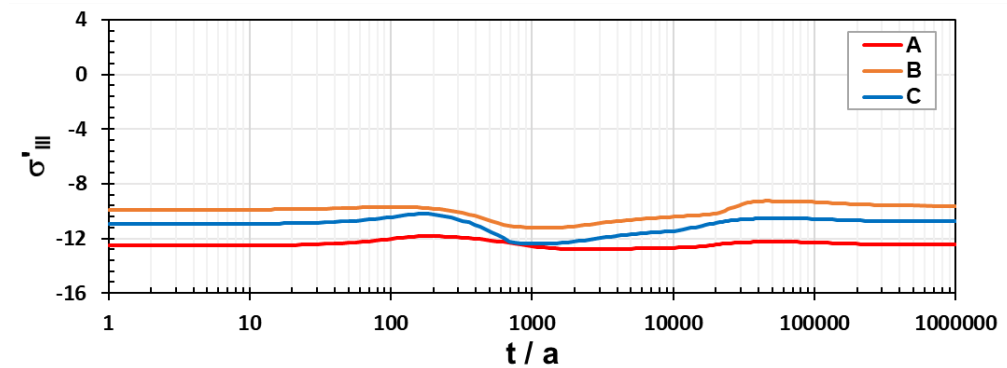
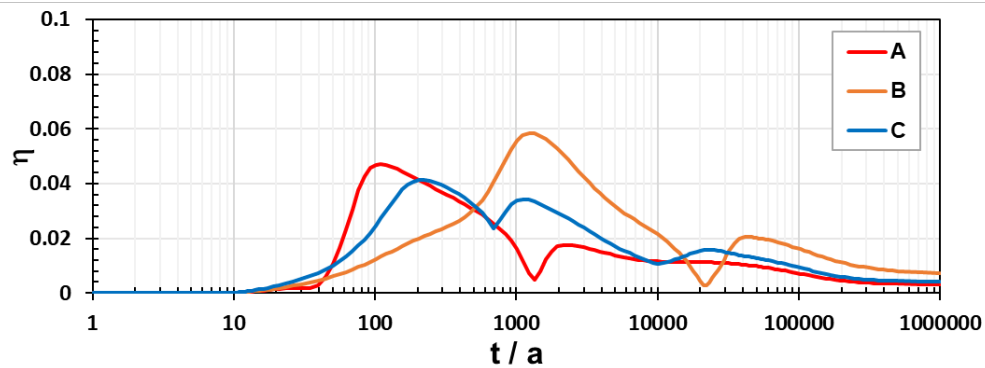
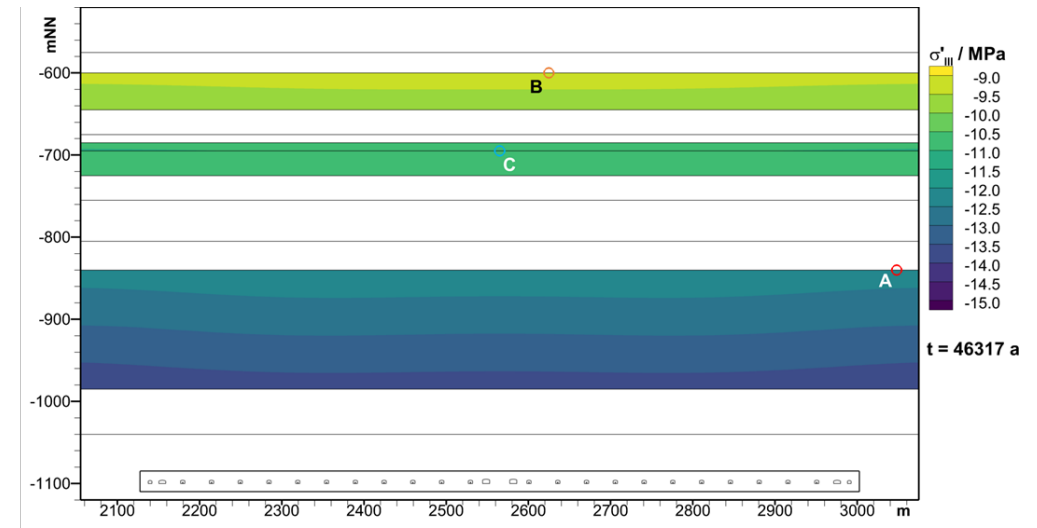
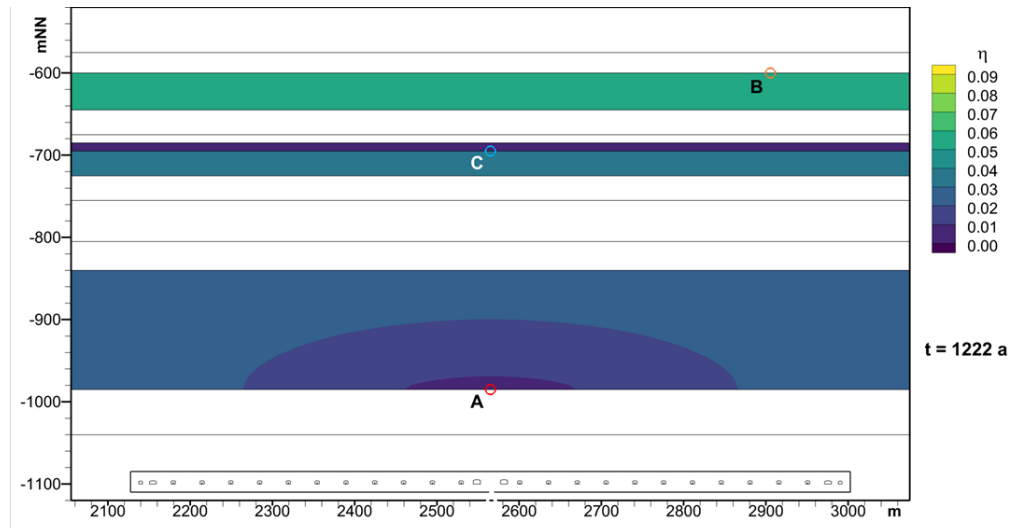


# Integritätsanalysen zum überlagernden ewG



Ergebnisse aus dem Vorhaben Resus:

Dilatanz- und Fluiddruckkriterium in überlagernden Steinsalzschichten



# Integritätsanalyse zum multiplen ewG



## Anforderungen und Randbedingungen

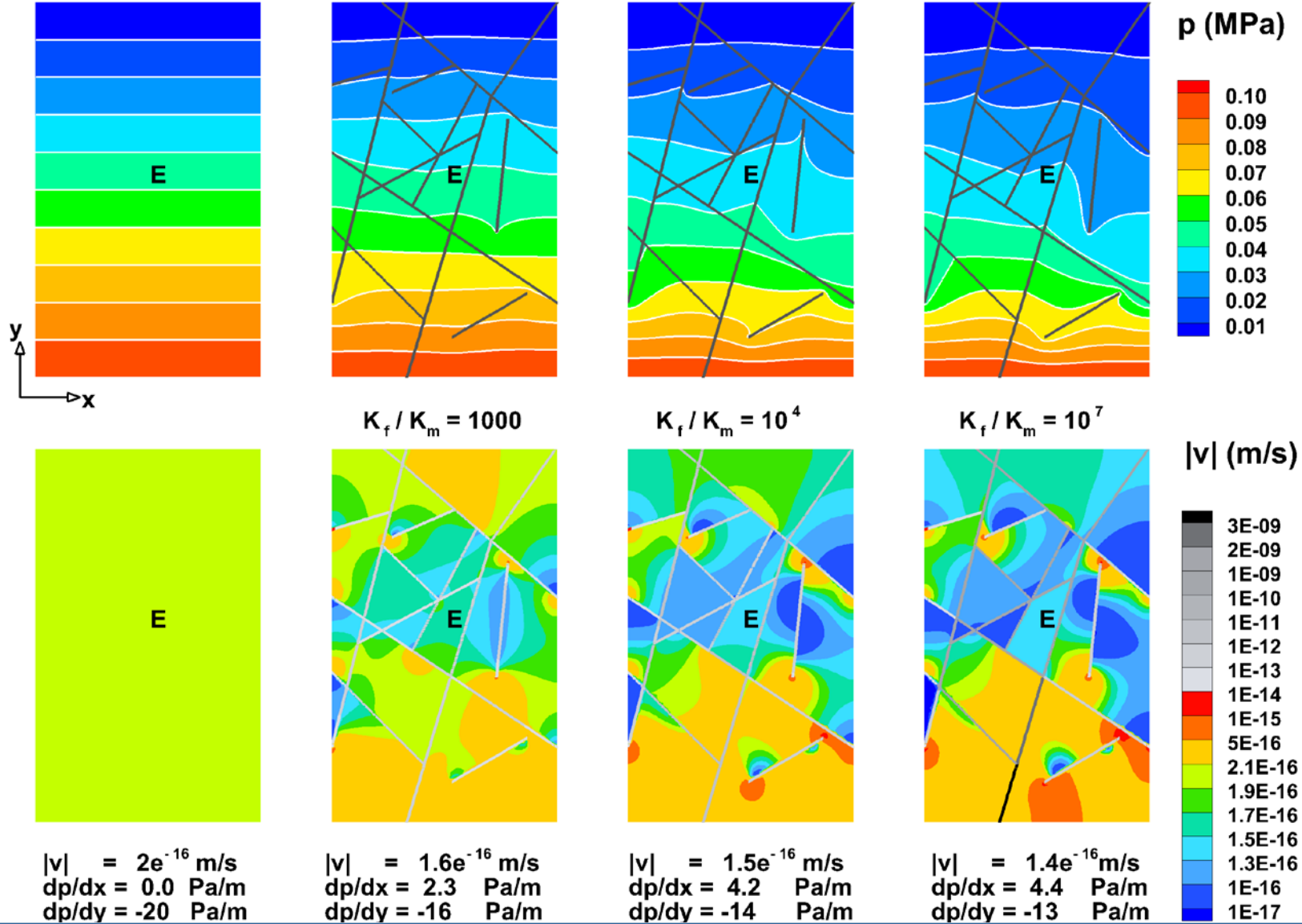
- Regionale hydraulische und thermische Gradienten
- Gebirgsspannungen
- Integritätsanalyse „nur“ für die ewG
  - hier keine hydraulisch aktiven Klüfte
- ≈25m Barriere zwischen Abfällen und ewG-Begrenzung
- ewG sind von Klüften begrenzt
- Beeinflussung der THM-Evolution in ewG durch
  - Klüfte im Umfeld?
  - Andere ewG?
  - Nahfeldprozesse?

## Modellierung

- Regional: THM-Verhalten des geklüfteten Kristallingesteins
- Nahfeldprozesse: Auffahrung, Verfüllmaterialien,...
- Bewährte Methode (THM-Kontinuums-Modell) könnte so beibehalten werden
- Zeitabhängige Randbedingungen
- Workflow zur Berücksichtigung von Klüften im Kontinuumsmodell notwendig
  - Zunächst Konzentration auf Hydraulik
  - Konzeptentwicklung notwendig
- Prinzipstudie zu Dominanz von Klüften



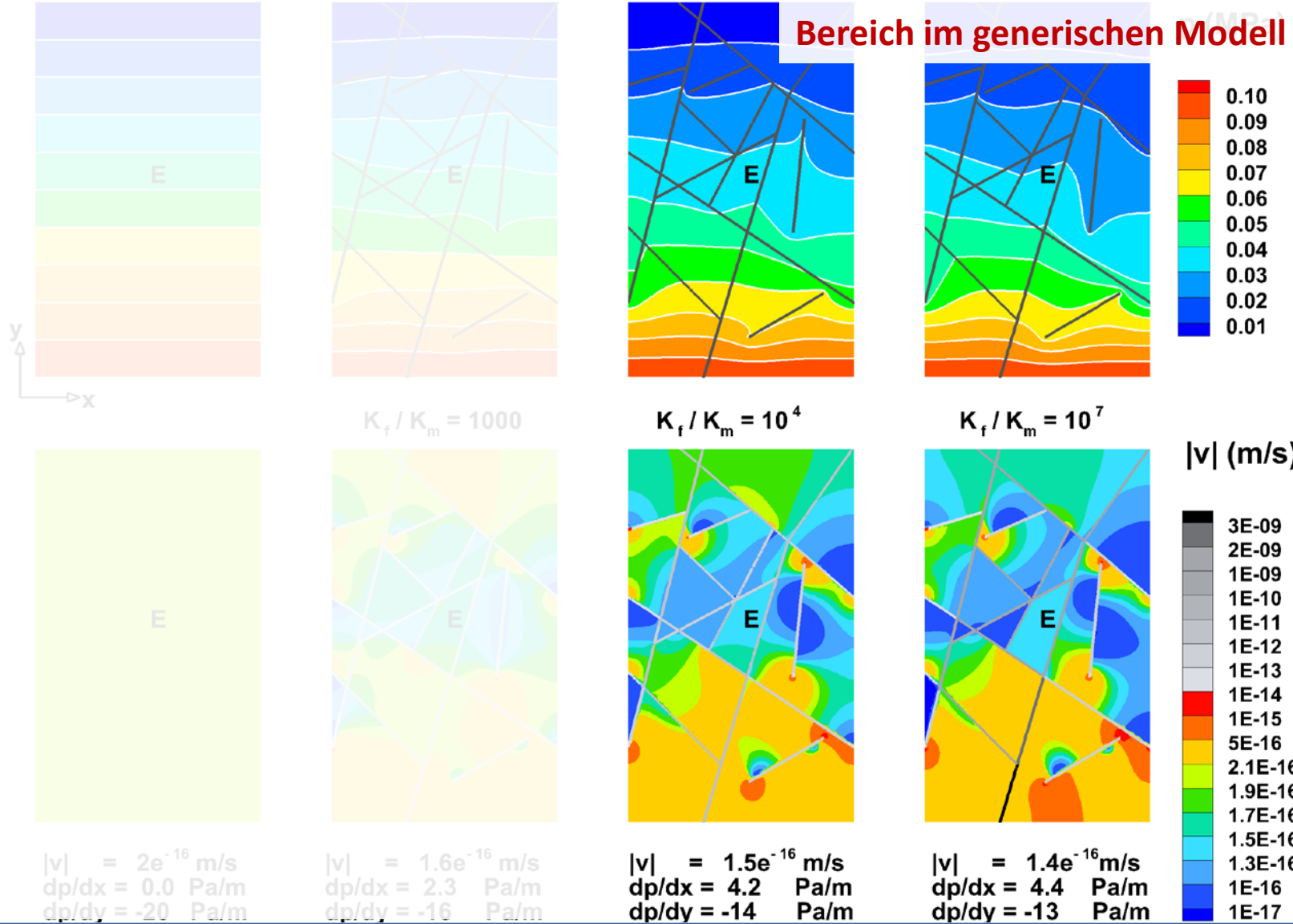
# Prinzipstudie zur Strömung in klüftig-porösen Medien



## a) Variation der Kluftpermeabilität

- Ab Faktor 1000 deutliche Beeinflussung des Druckfeldes
- Max. Erhöhung von  $v$  in der Matrix etwa 2 GO
- Im Endlagerbereich:
  - Geringe Verringerung von  $v$
  - Änderung der Strömungsrichtung

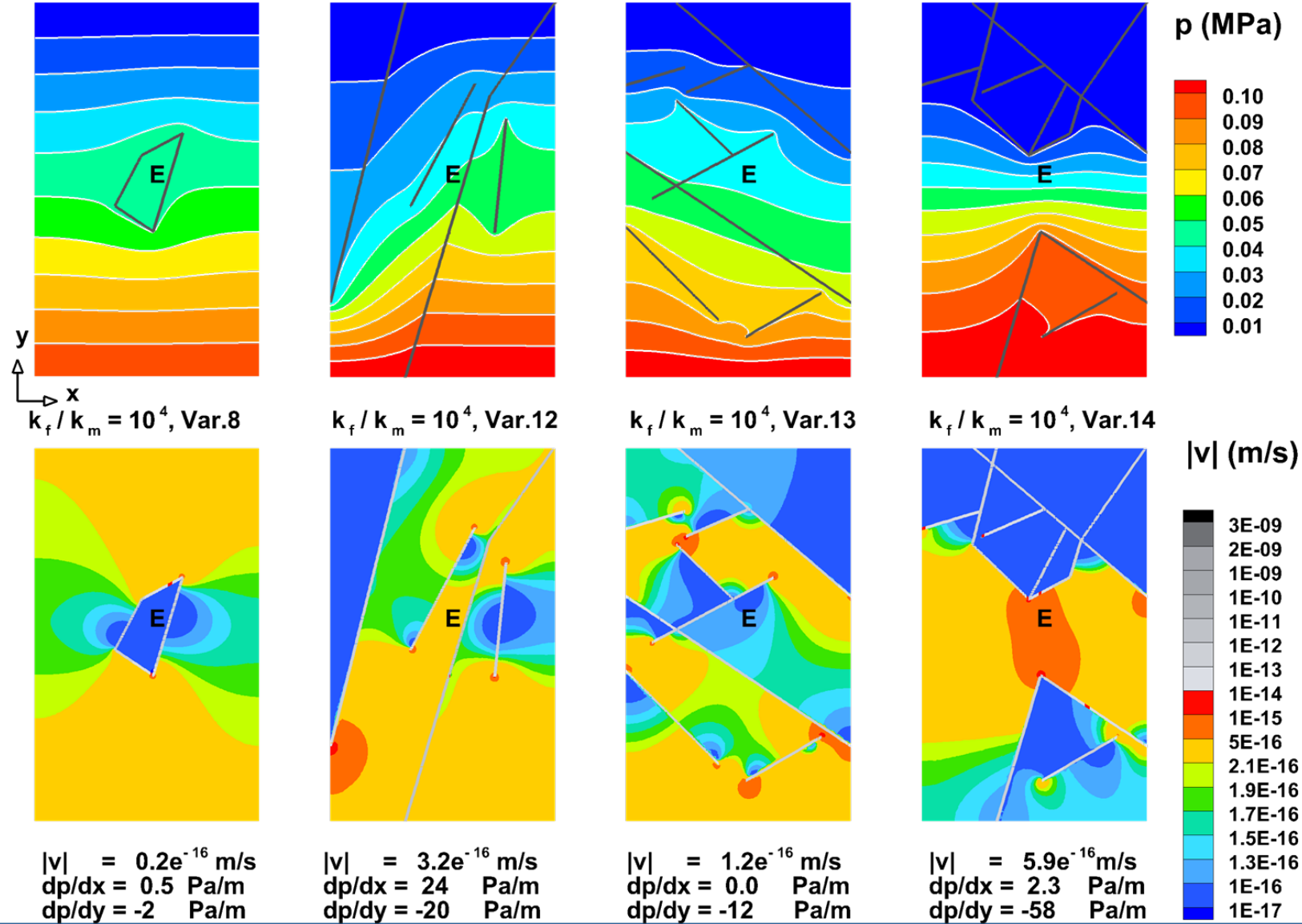
# Prinzipstudie zur Strömung in klüftig-porösen Medien



## a) Variation der Kluftpermeabilität

- Ab Faktor 1000 deutliche Beeinflussung des Druckfeldes
- Max. Erhöhung von  $v$  in der Matrix etwa 2 GO
- Im Endlagerbereich:
  - Geringe Verringerung von  $v$
  - Änderung der Strömungsrichtung

# Prinzipstudie zur Strömung in klüftig-porösen Medien



## b) Variation des Kluftnetzwerks

- Vernetzung hat einen großen Einfluss
- „Hydraulischer Käfig“  
-> Verringerung von  $v$  (1/10)
- „Clustergrenze“  
-> Erhöhung von  $v$  (3-fach)

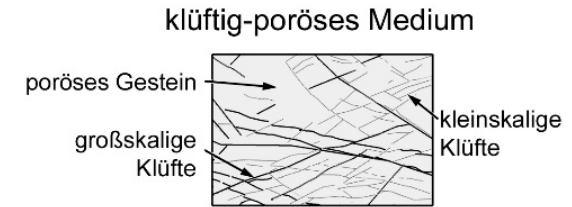
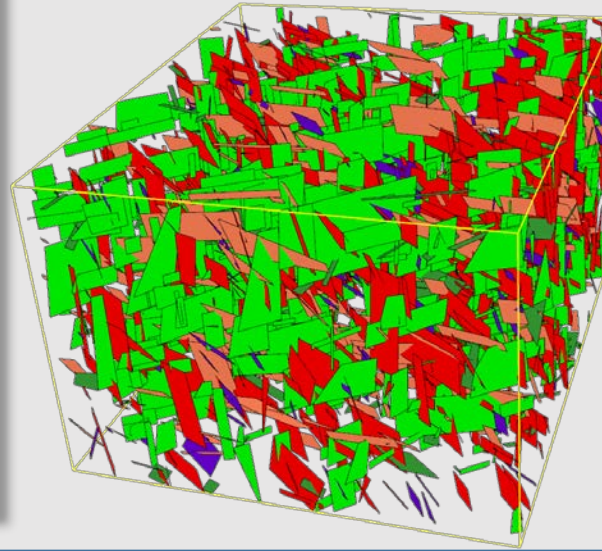
➤ Kluftnetzwerk und Kluftigenschaften müssen berücksichtigt werden!

# Entwicklung Modellierungskonzept

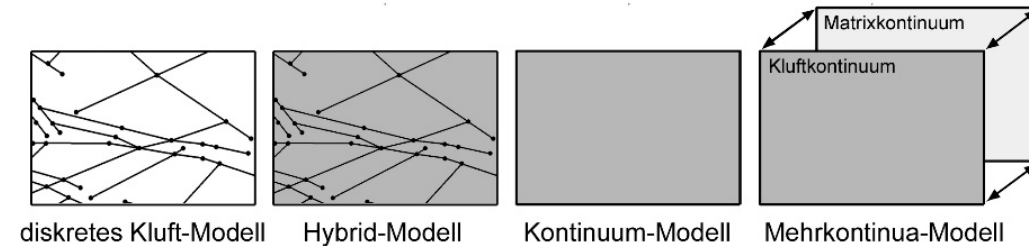
## Generisches geologisches Modell „mewG“

### 1.2 Hydraulische Eigenschaften

| Modelleinheit                             | Bandbreite/Wert                                 |
|---|---|
| k <sub>f</sub> -Wert [m·s <sup>-1</sup> ] |   |
| Deckgebirge                               | 3 · 10 <sup>-7</sup> bis 3 · 10 <sup>-5</sup>   |
| Wirtsgestein (ungeklüftet)                | 1 · 10 <sup>-15</sup> bis 1 · 10 <sup>-12</sup> |
| Wirtsgestein (geklüftet)                  | 1 · 10 <sup>-13</sup> bis 1 · 10 <sup>-6</sup>  |

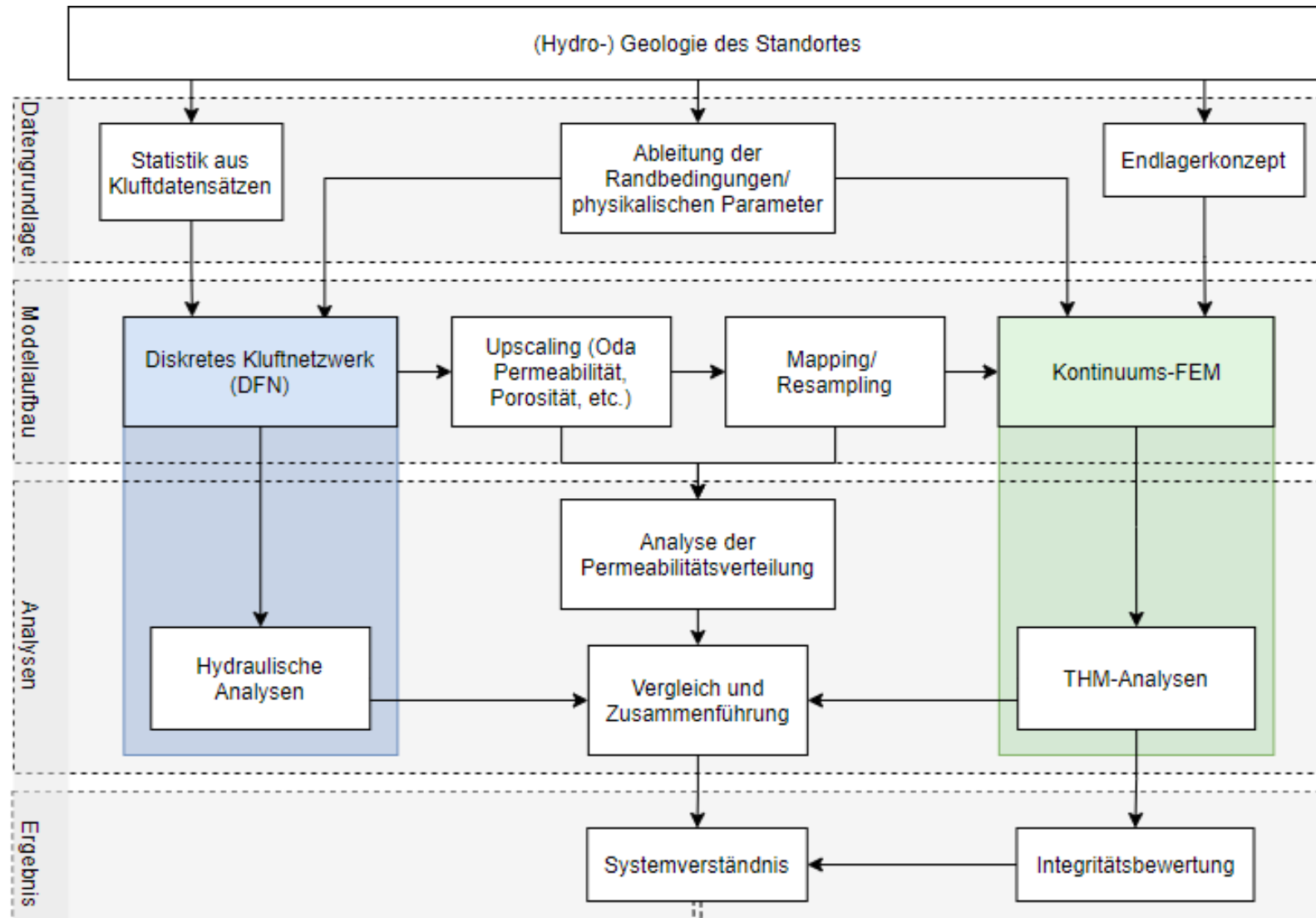


### Modellansatz



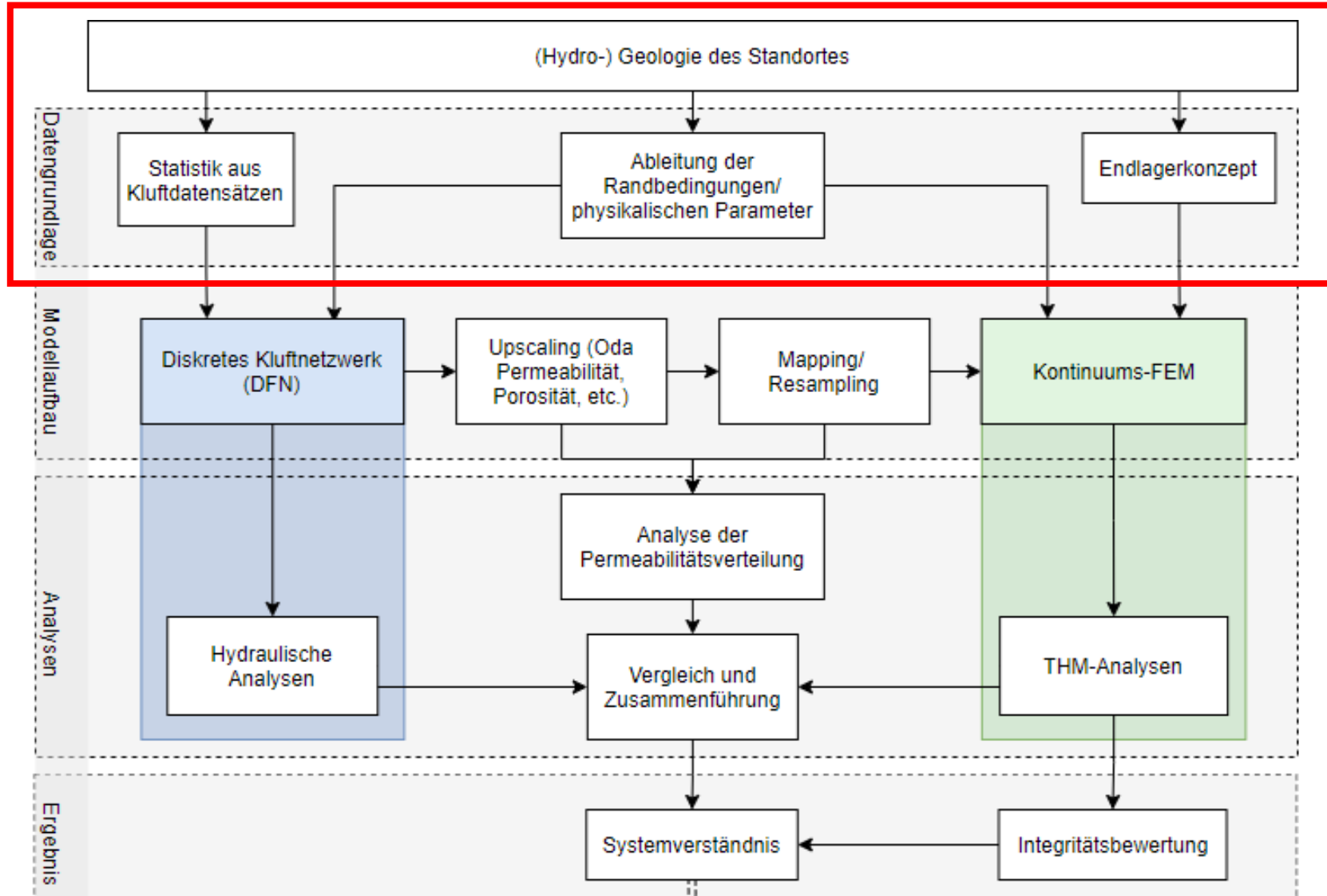
- $K_f/k_m = 1e7$  -> Klüfte dominant auf regionaler Ebene
- Matrix kann nicht vernachlässigt werden (Integritätsanalyse im ungeklüfteten ewG)
- Hybridmodell wegen Anzahl der Klüfte und deren Vernetzung weniger geeignet
- DFN und Kontinuumsmodell werden betrachtet
- Upscaling auf Kontinuumsebene notwendig

# Modellierungskonzept





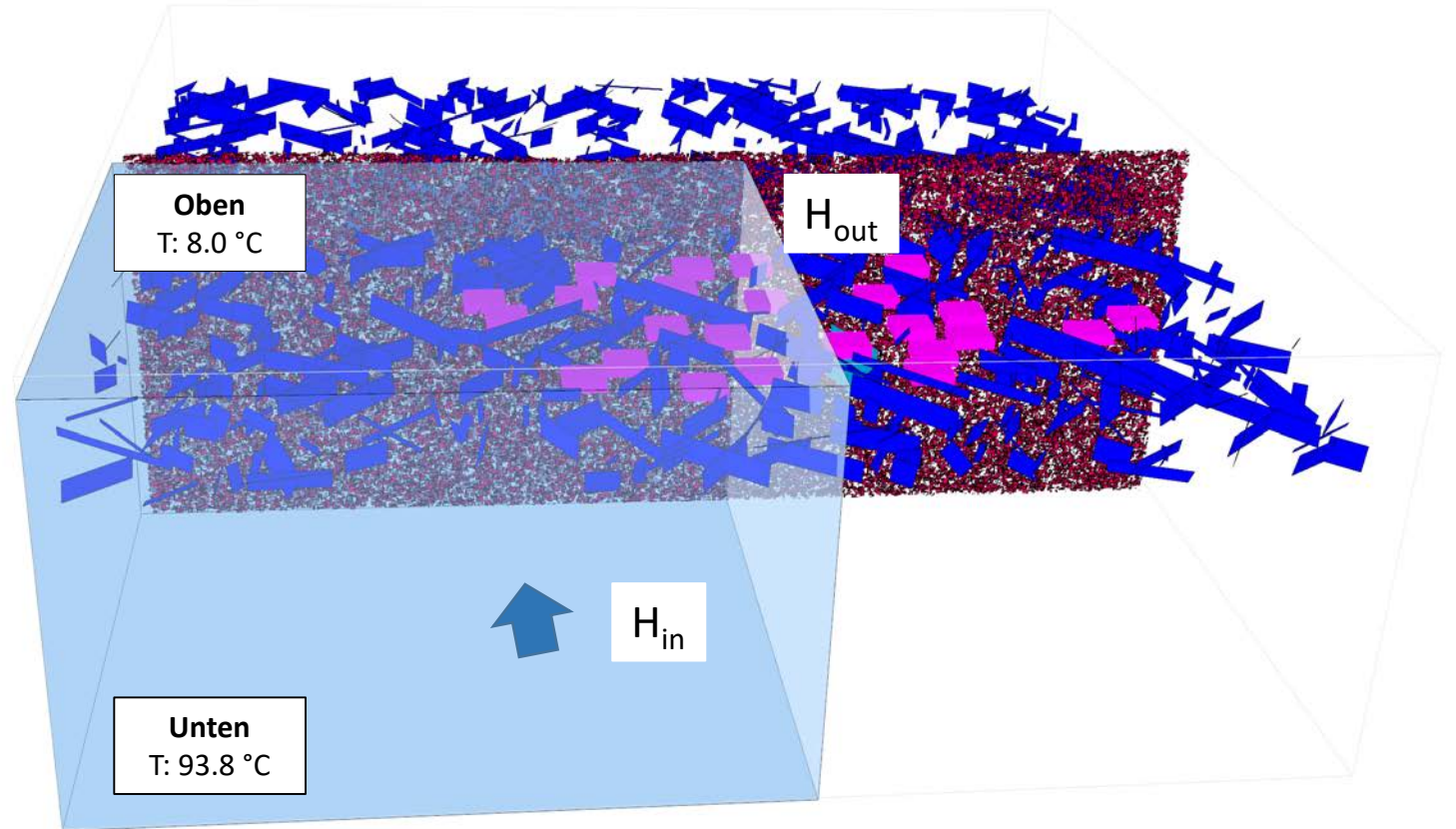
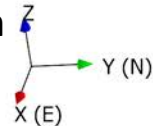
# Modellierungskonzept: Modellaufbau



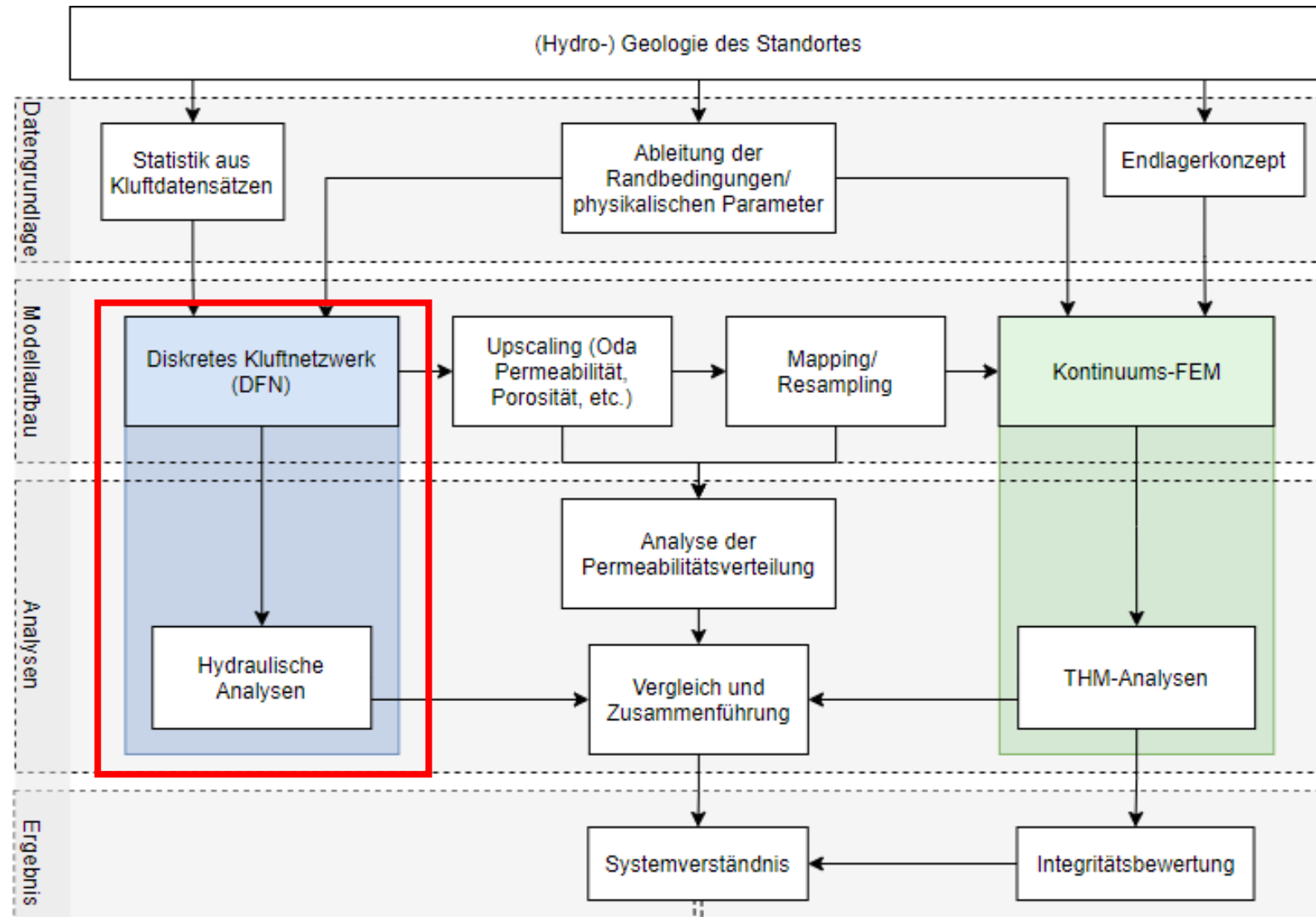
# Modellaufbau

## 3D-Modell

- Prozesse: THM
- Permeabilitäten:
  - $k_F = 5e-13 \text{ m}^2$
  - $k_M = 1e-20 \text{ m}^2$
  - $k_F/k_M = 5e7$
- Fluiddichte  $\rho$ :  $f(T, P)$
- Fluidviskosität  $\mu$ :  $f(T, C=1,1 \text{ kg m}^{-3})$
- Horizontaler hydraulischer Gradient 0,2%
- Geothermischer Gradient 30 K/km
- ewG-Bereiche mit homogen isotropen Eigenschaften



# Modellierungskonzept: DFN – hydraulische Analysen



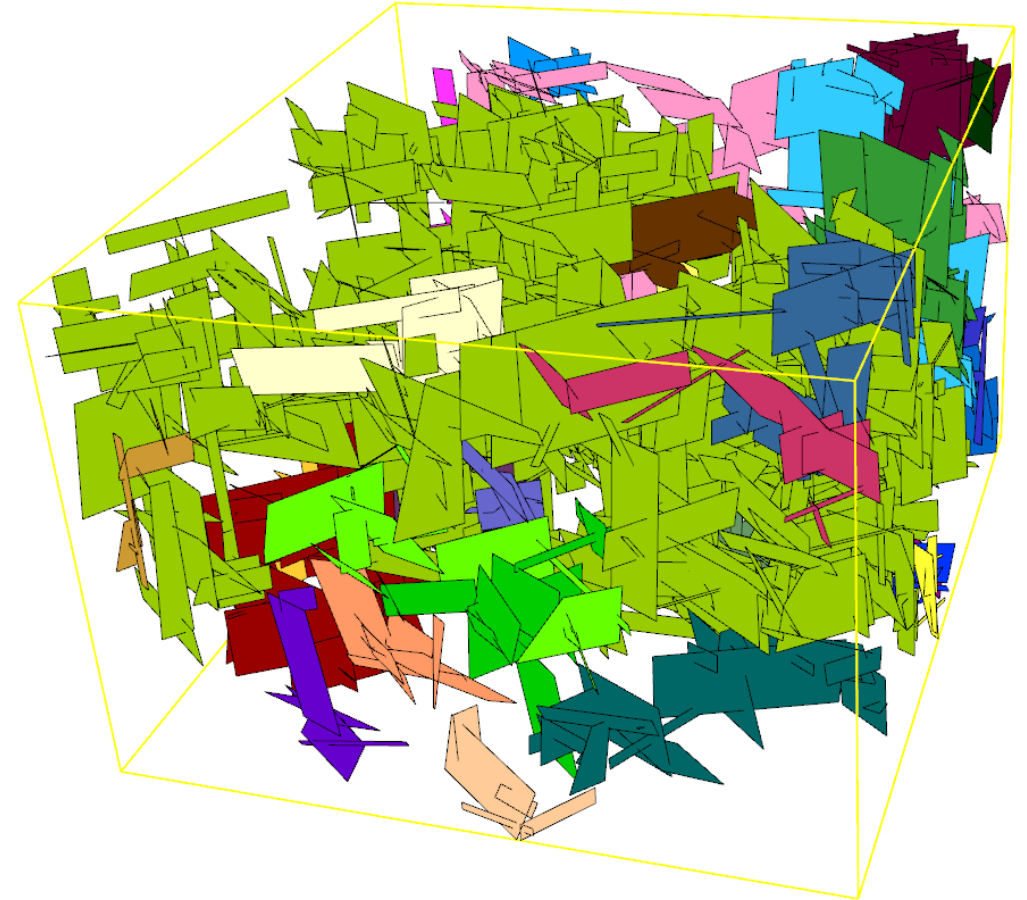
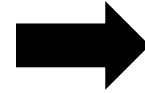
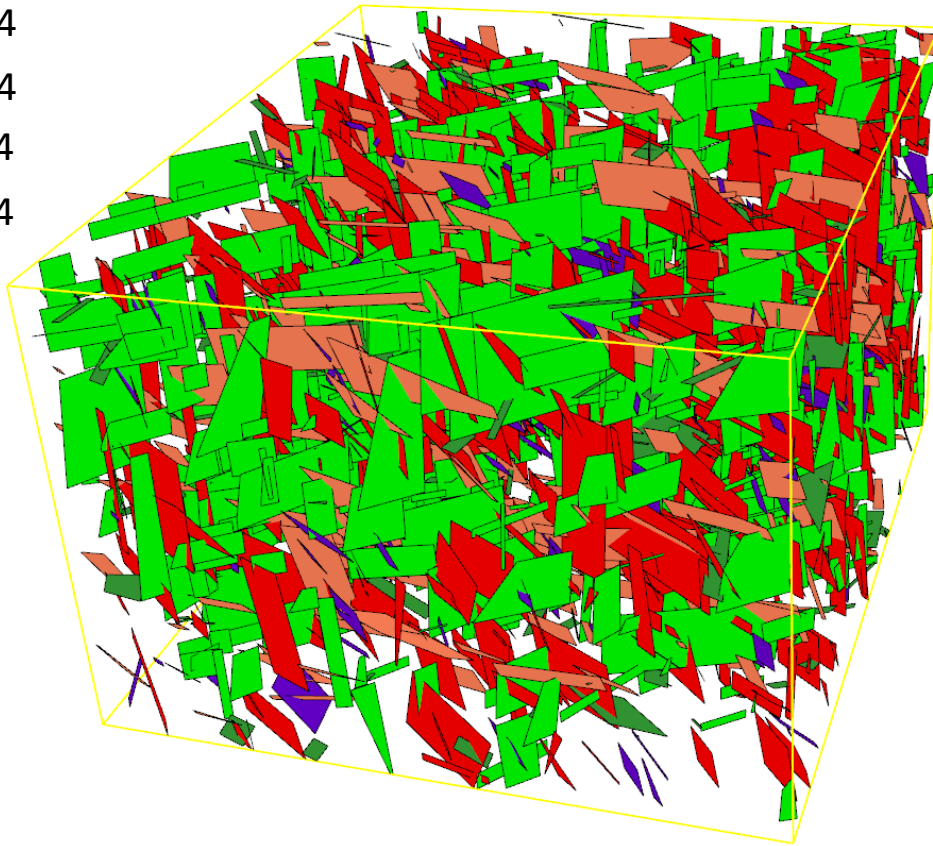


# DFN – hydraulische Analysen

Geologisches Modell  
• 5 Kluftsysteme

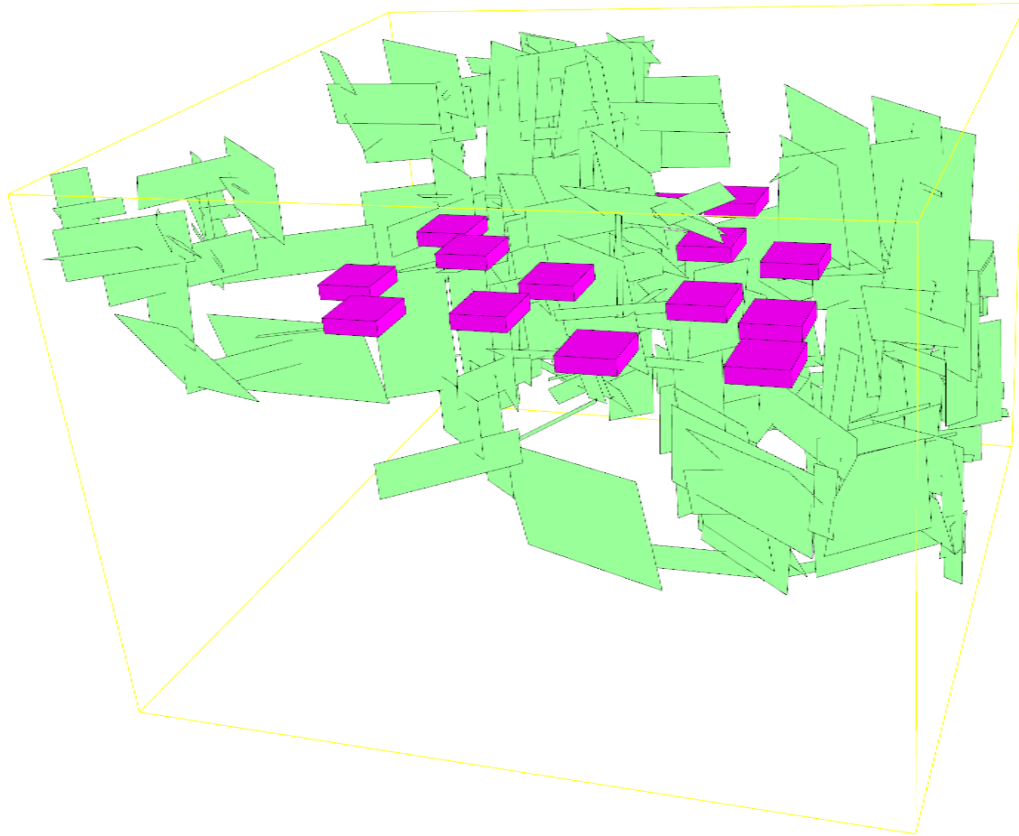
Cluster Analysis  
• insgesamt 35 Clustern

- K2\_V4
- K3\_V4
- K4\_V4
- S1\_V4
- S2\_V4

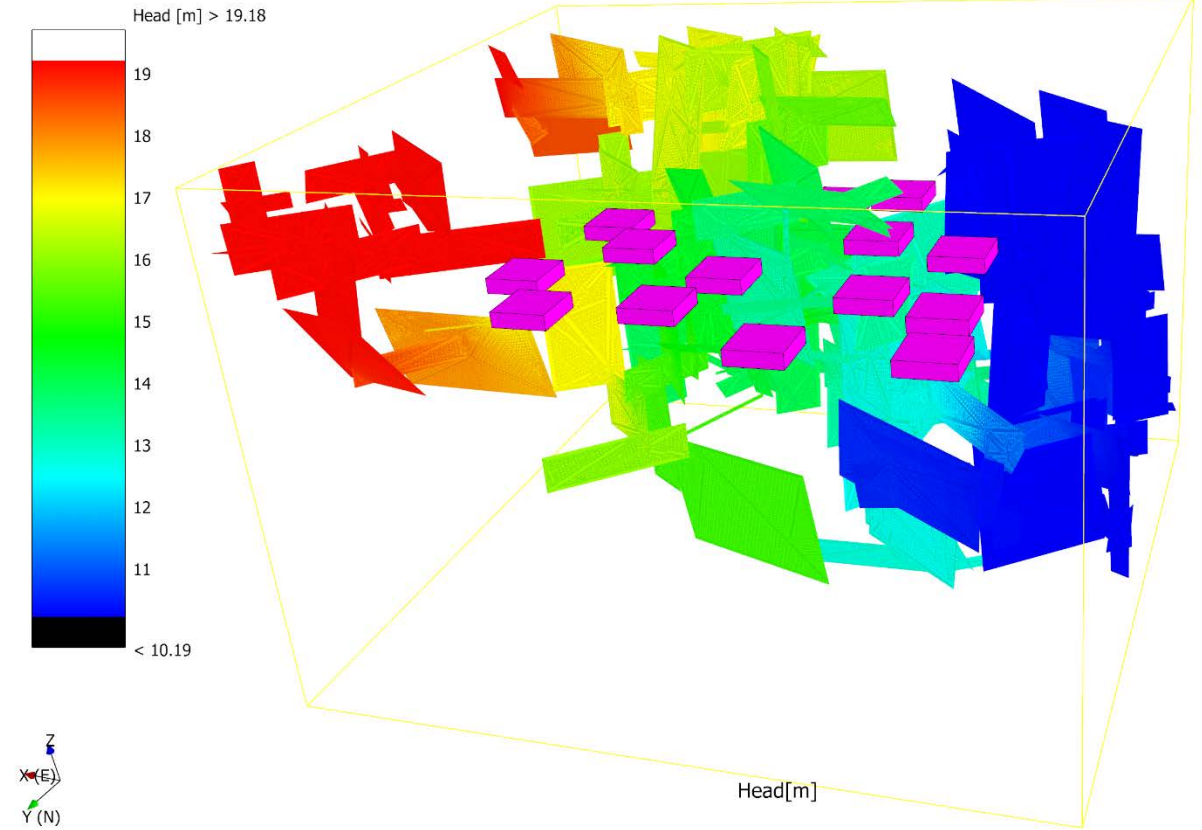


# DFN – hydraulische Analysen

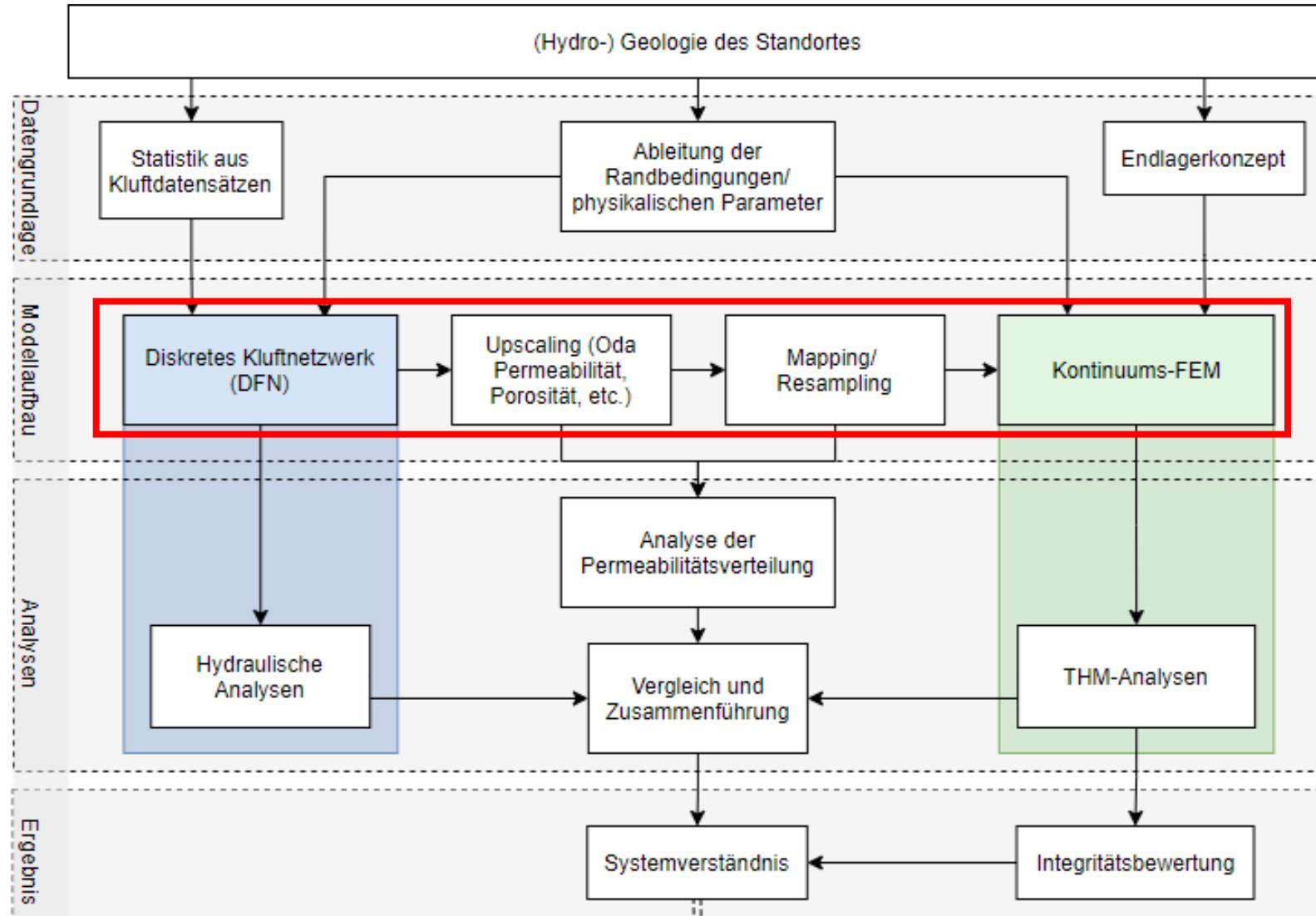
Verbundene Klüfte



Stationäre Strömungsanalyse



# Modellierungskonzept: Upscaling / Mapping



# Upscaling / Mapping: Übersicht

## Generierung eines 3D-DFN-Modells (FracMan)

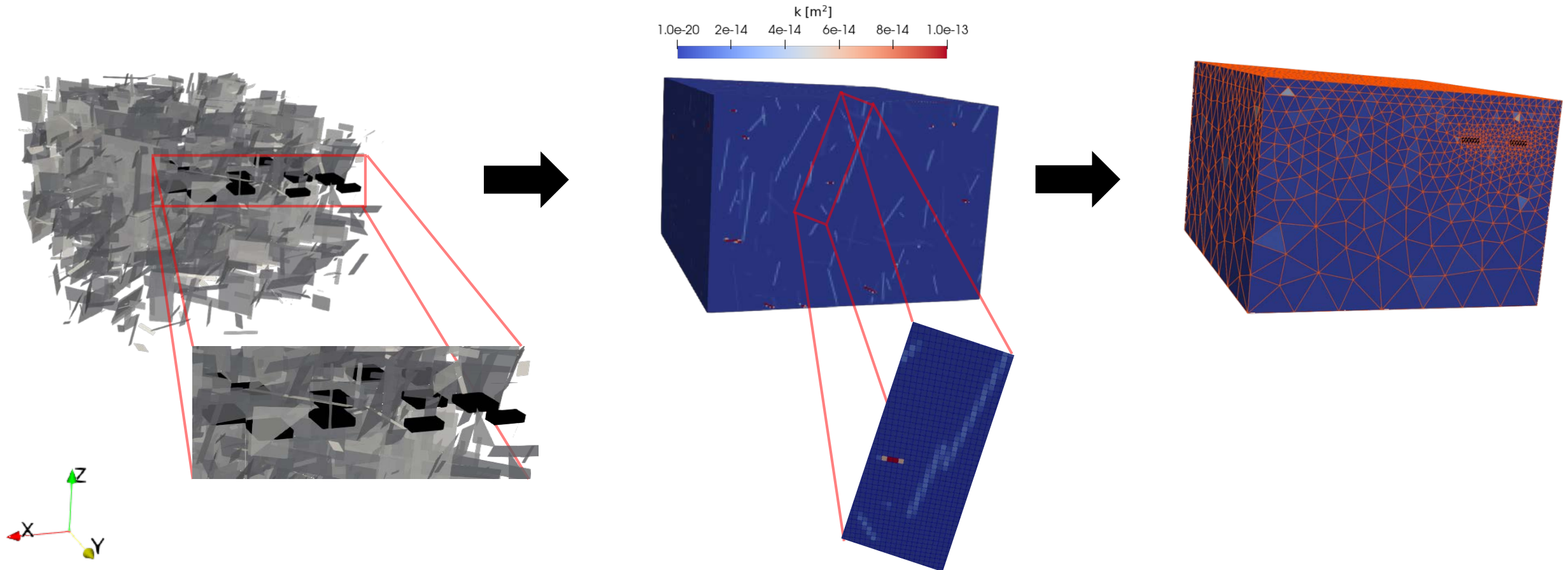
- Gesamtmodell
- Klüfte 2D
- Festlegung der H-Eigenschaften der Klüfte

## Upscaling der Kluft Eigenschaften z.B.

- Permeabilität  $k$  [ $\text{m}^2$ ]
- Porosität  $n$  [-]
- Mesh – Hexaeder

## 3D-Kontinuumsmodell (OGS)

- Mapping der hochskalierten Eigenschaften
- Klüfte als Zonen höherer Permeabilitäten

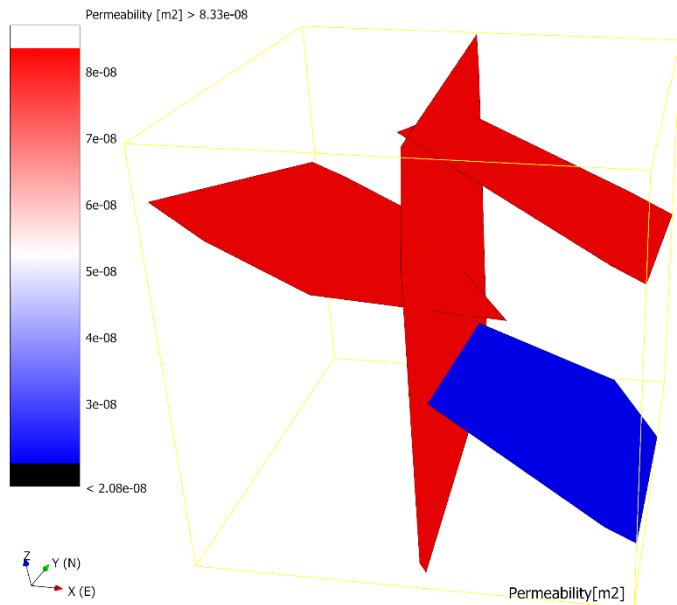




# Upscaling / Mapping: Verifikation

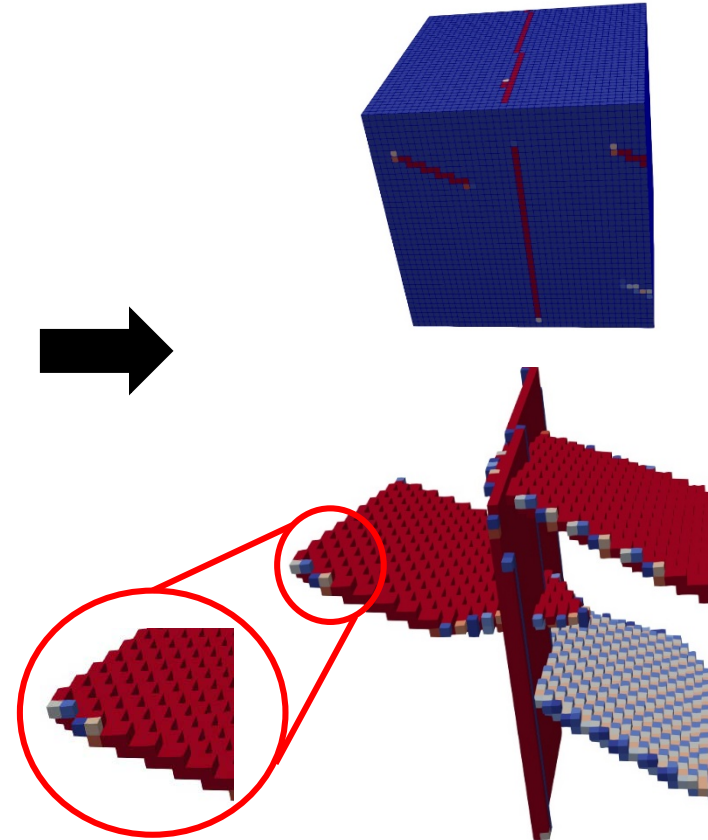
## DFN-Model

- Verifikationsproblem aus dem DECOVALEX Projekt (<https://decovallex.org/>)



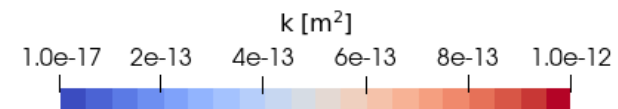
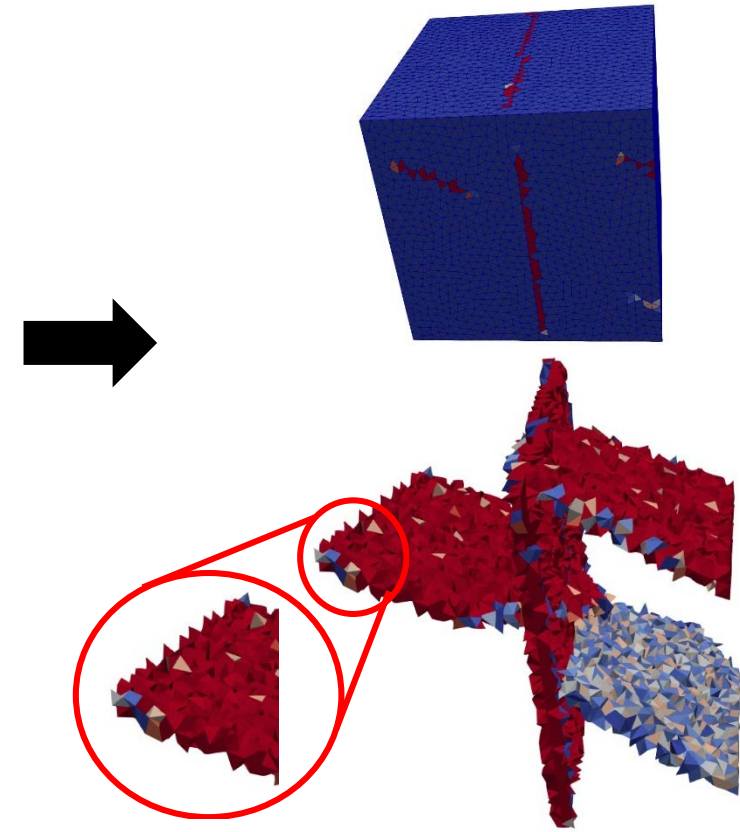
## Hochskalierte Kluftigenschaften

- Permeabilität  $k$  [ $m^2$ ]
- Porosität  $n$  [-]
- Würfelgitter

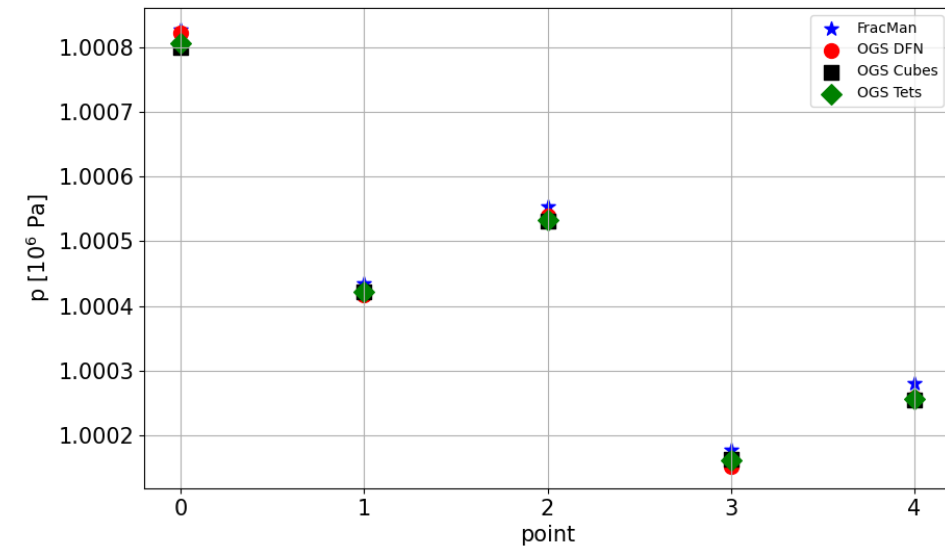
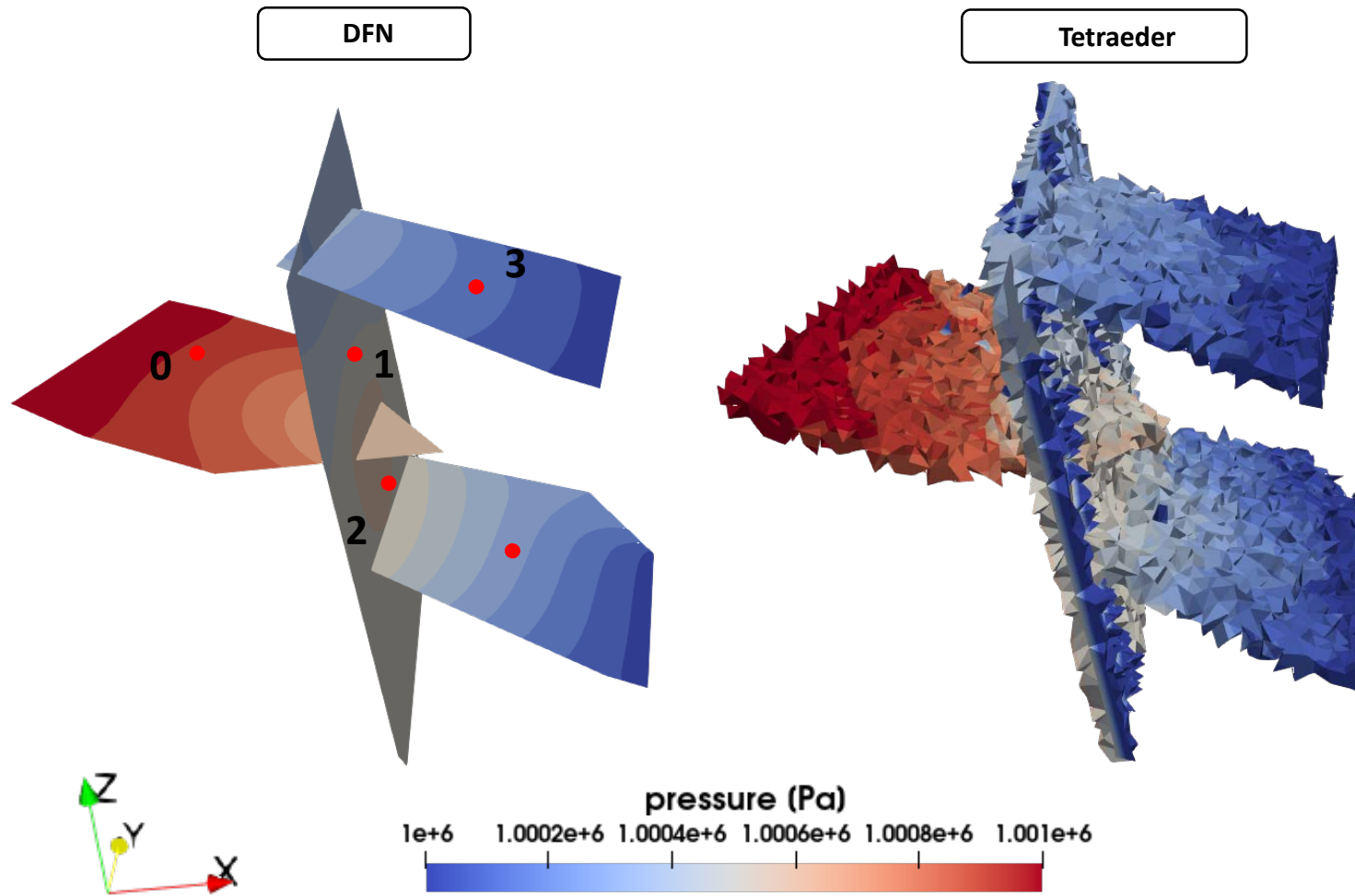


## 3D-FE Modell

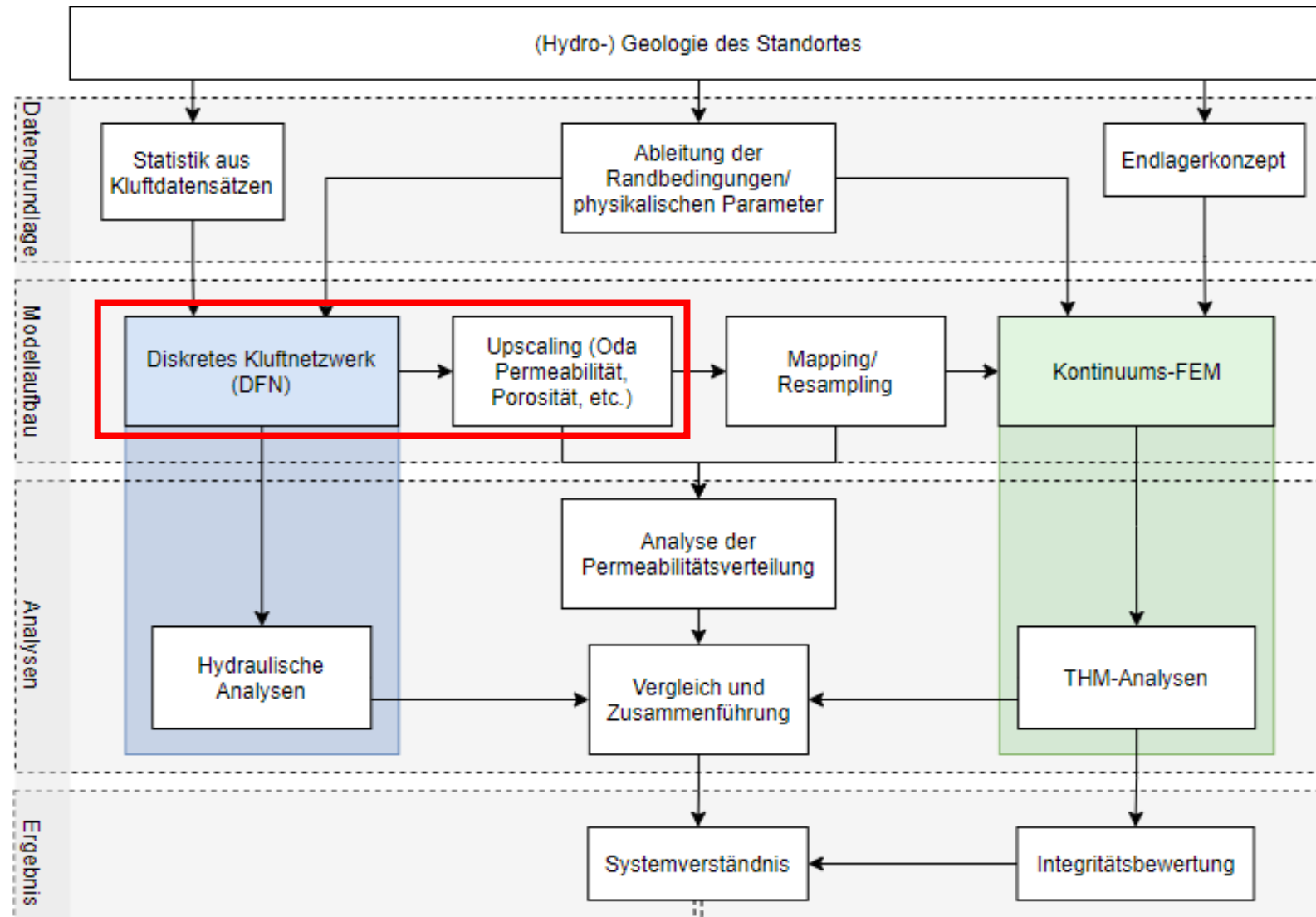
- Unstrukturierte Gitter
- Nicht an Klüfte angepasst



# Upscaling / Mapping: Verifikation



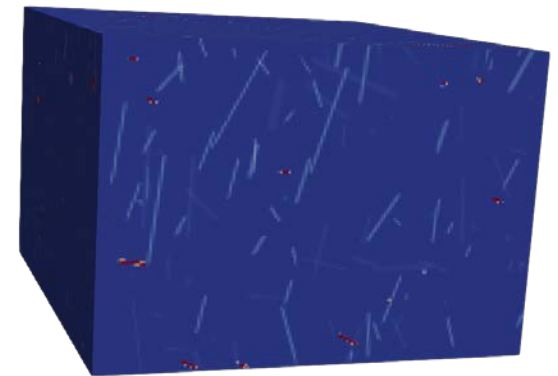
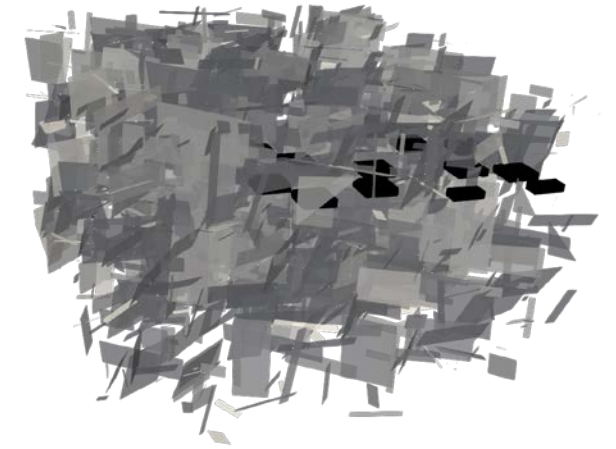
# Modellierungskonzept: DFN – Upscaling



# Upscaling der Klufteigenschaften

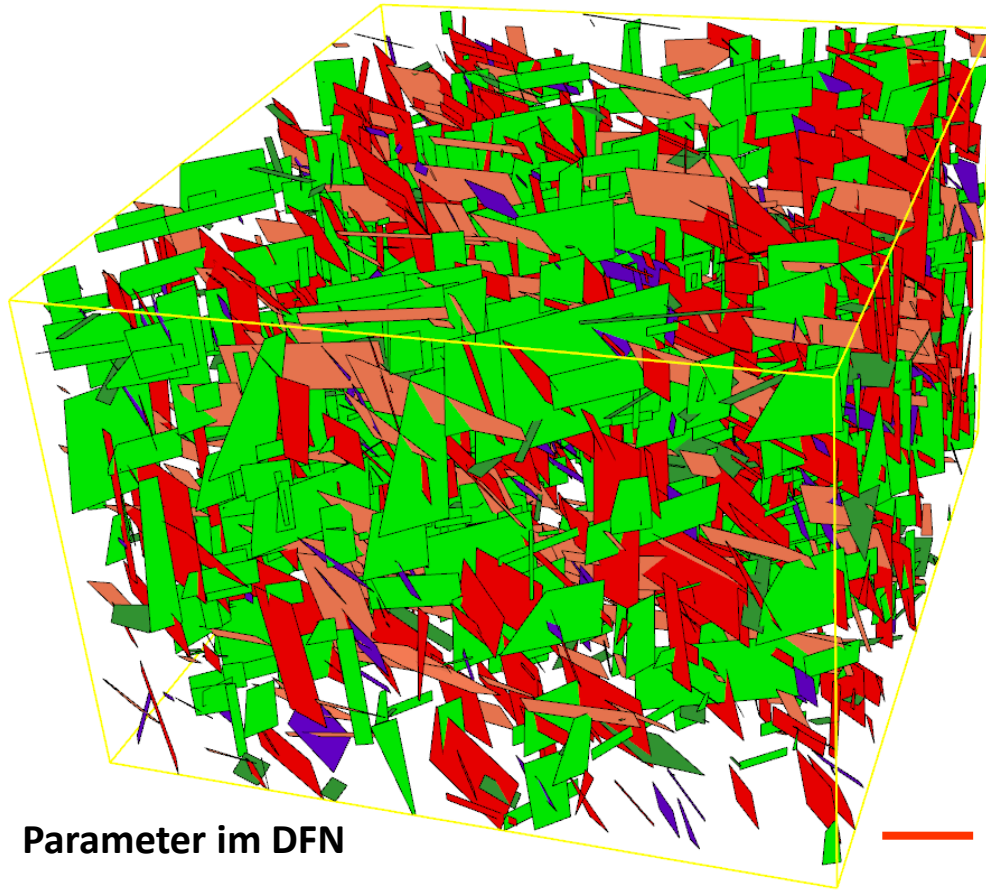
Ansatz nach Oda 1985

- Voller 3D-Permeabilitätstensor für jede Zelle
- Rein geometrisch, Keine Strömungsberechnung
- Klufftransmissivitäten gewichtet aggregiert
- Keine Berücksichtigung der Vernetzung
- Überschätzung der Permeabilität
- Implementierung Golder-FracMan<sup>®</sup>
  - Zusätzliche Konnektivitätsprüfung





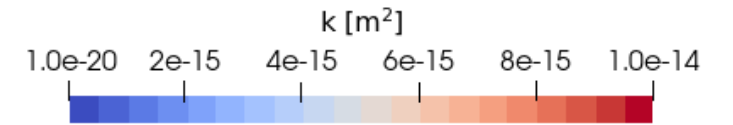
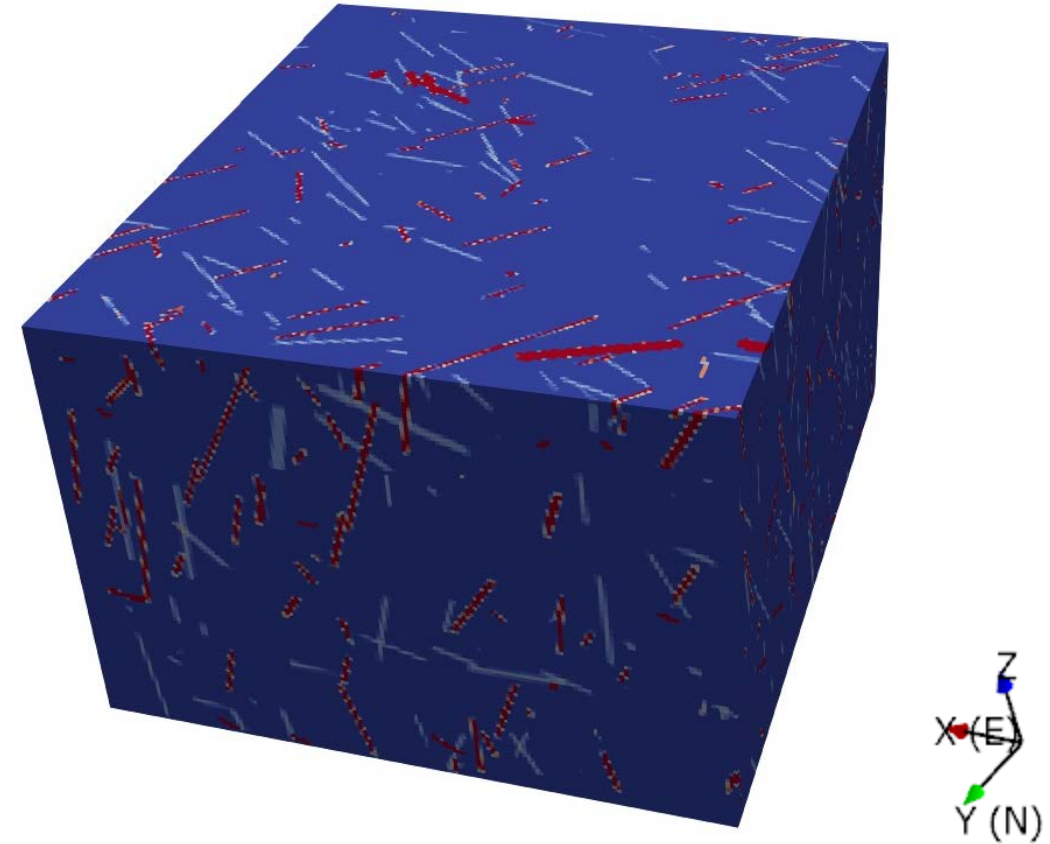
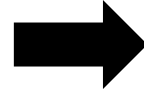
# Upscaling



## Parameter im DFN

- Porosität Matrix 0.01
- Permeabilität Matrix  $1e-20 \text{ m}^2$
- Kluftöffnungsweite 0.001 m
- Kluftpermeabilität  $5e-13 \text{ m}^2$

- K2\_V4
- K3\_V4
- K4\_V4
- S1\_V4
- S2\_V4

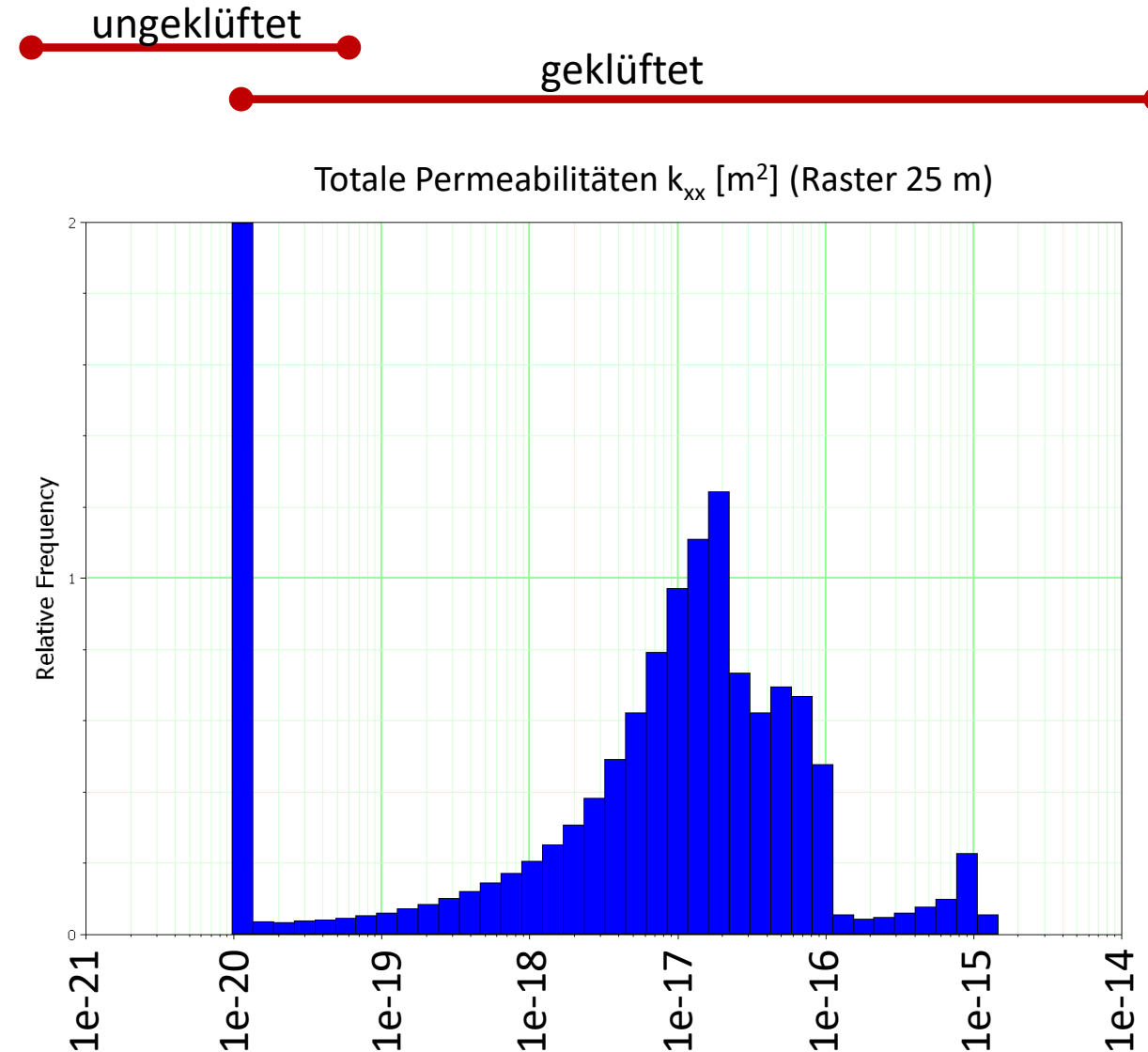


# Upscaling: Permeabilität

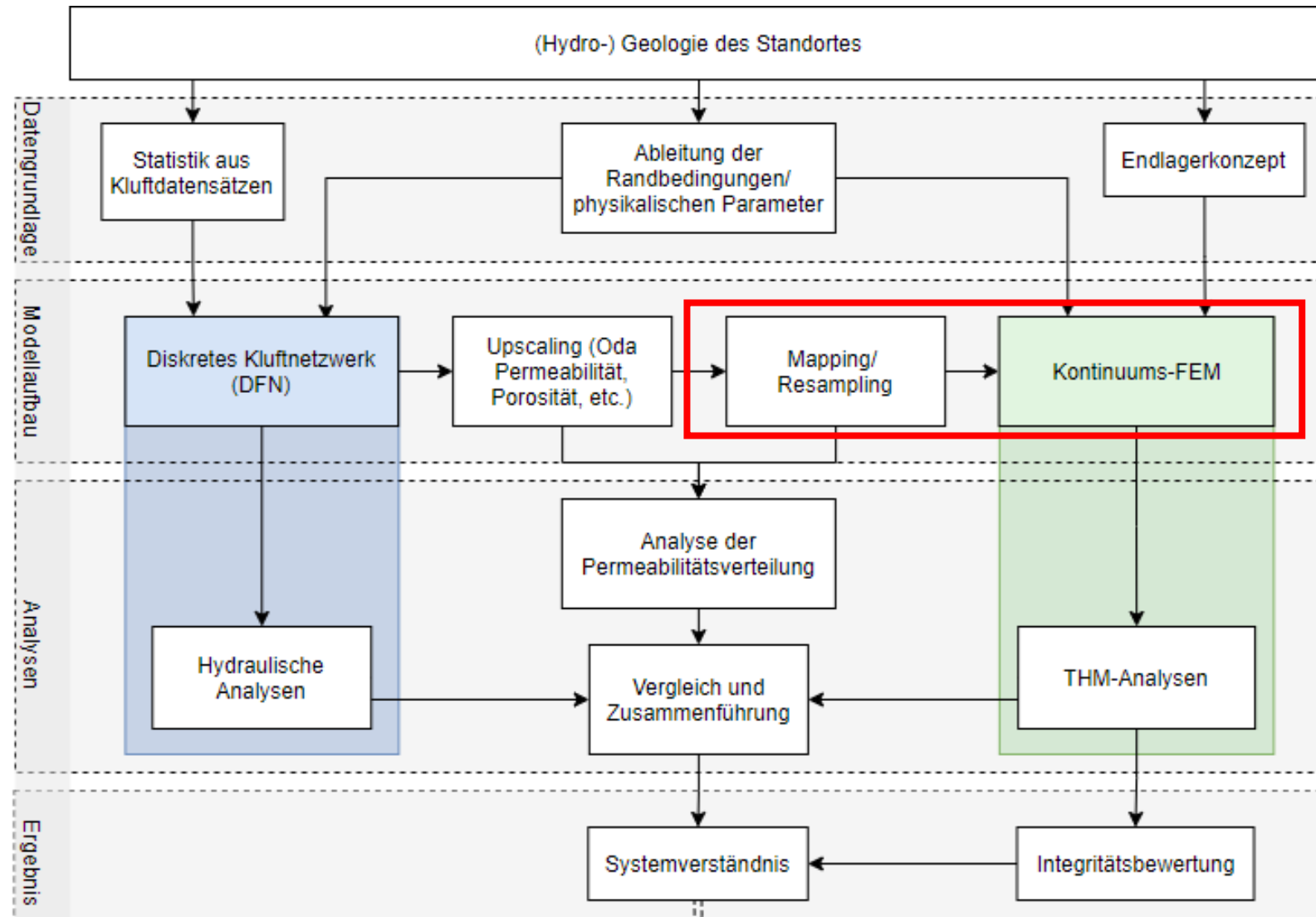
## Modellbericht multipler ewG

### 1.2 Hydraulische Eigenschaften

| Modelleinheit  | Bandbreite/Wert                           | Kommentar  |
|--|---|--|
| <b><math>k_f</math> Wert [<math>m \cdot s^{-1}</math>]</b> |   |  |
| Deckgebirge  | $3 \cdot 10^{-7}$ bis $3 \cdot 10^{-5}$   |  |
| Wirtsgestein (ungeklüftet)                                 | $1 \cdot 10^{-15}$ bis $1 \cdot 10^{-12}$ | entspricht im „multipler ewG“ den Annahmen für die ewG Bereiche  |
| Wirtsgestein (geklüftet)                                   | $1 \cdot 10^{-13}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$  | entspricht im „multipler ewG“ dem Wirtsgestein außerhalb der ewG und im „mKBS-3“ dem gesamten Wirtsgestein |
| Lamprophyrgang   | $1 \cdot 10^{-7}$ bis $1 \cdot 10^{-5}$   | angelehnt an Deckgebirge angenommen  |
| <b>Effektive Porosität</b>                                 |   |  |
| Deckgebirge  | 0,02                                      |  |
| Wirtsgestein   | 0,01                                      |  |

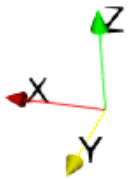
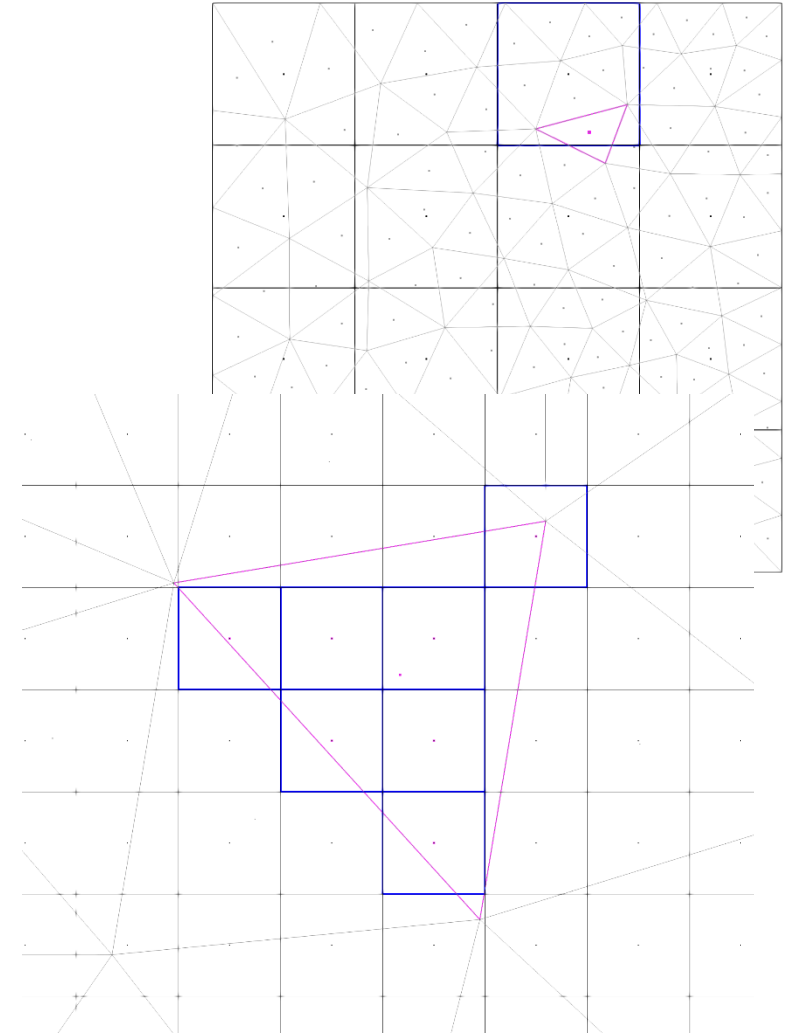


# Modellierungskonzept: Mapping - FEM



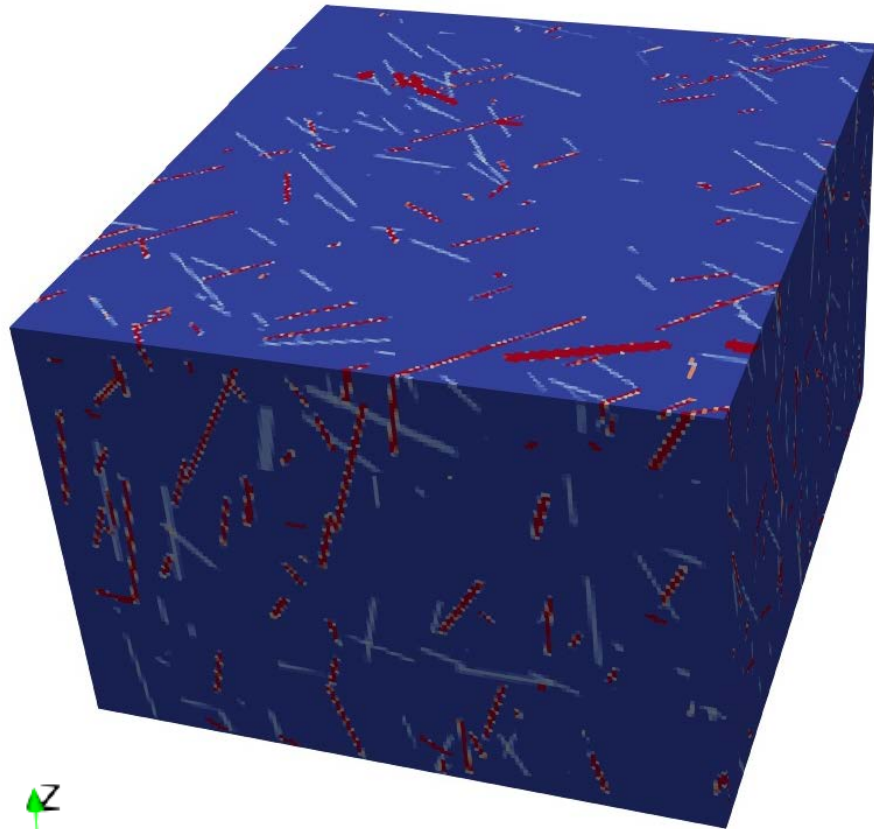
# Mapping der hochskalierten Eigenschaften

- Übertragung der Eigenschaften vom Würfelgitter
- Unabhängige, unstrukturierte Gitter mit variierender Zellgröße
- Eigener Ansatz basierend auf Position der Zellmittelpunkte
- Eigenschaften des Mappings
  - Jede FE-Zelle wird mit Werten belegt
  - Alle Eingabewerte auf den Würfeln werden berücksichtigt
- Erweiterungen möglich z.B: unterschiedlicher Zellgrößen

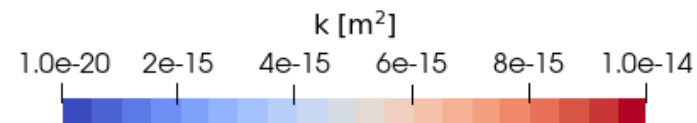
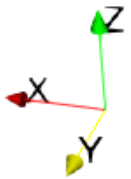
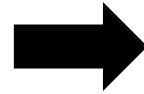
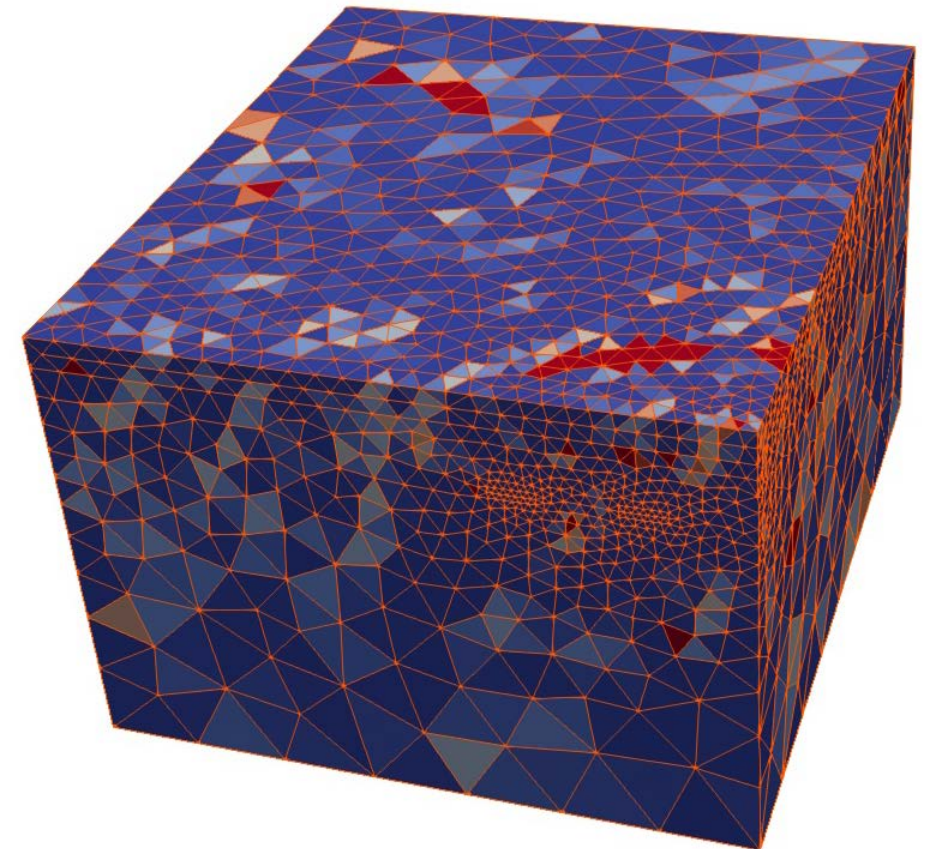


# Mapping der Permeabilitäten

Würfelnetz mit Permeabilitäten, upgescaled aus dem DFN

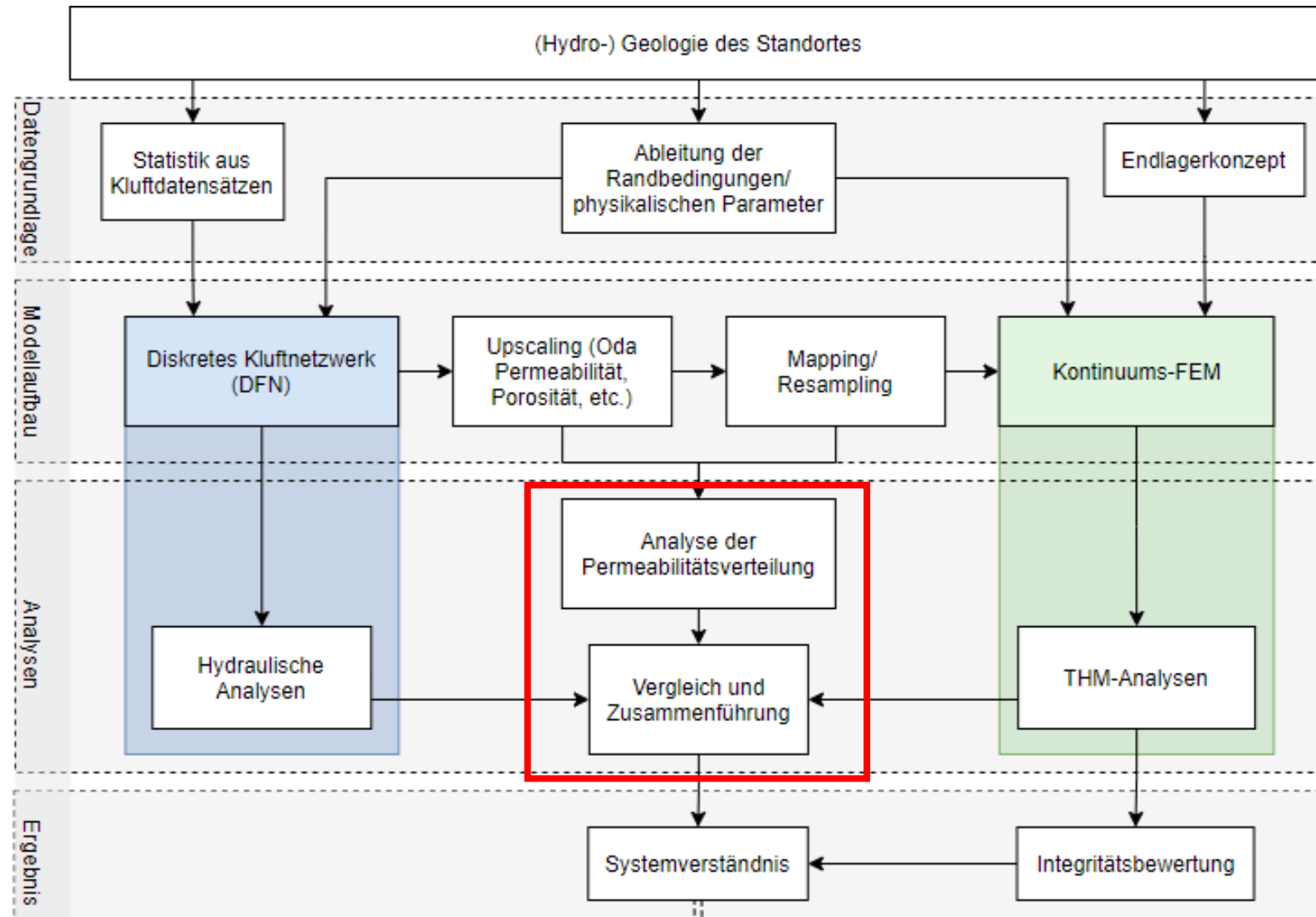


Tetraedernetz mit Permeabilitäten, gemapped





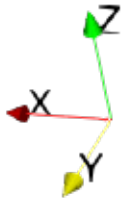
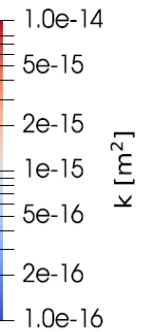
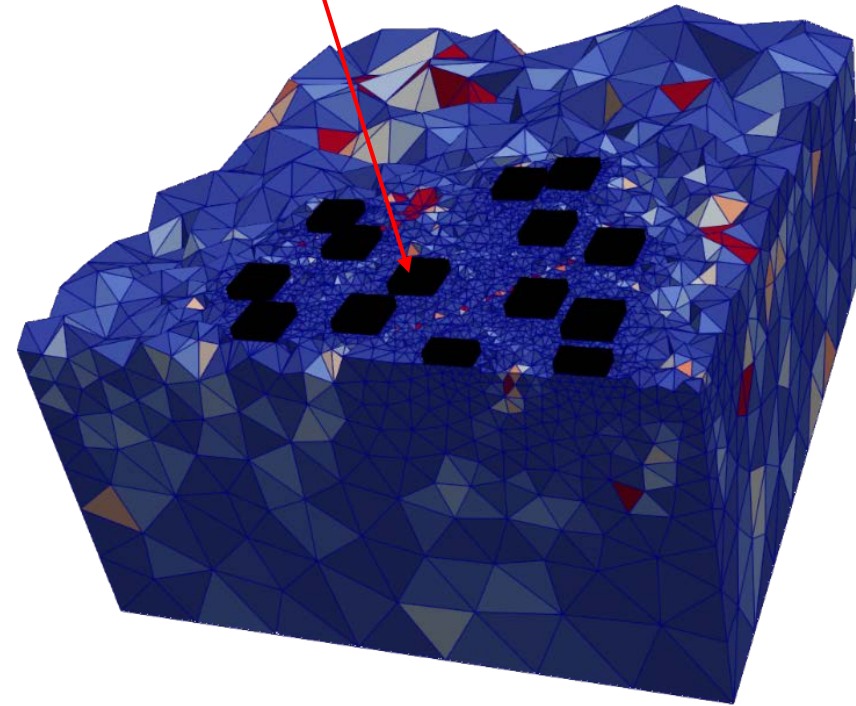
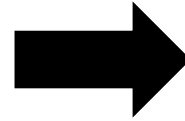
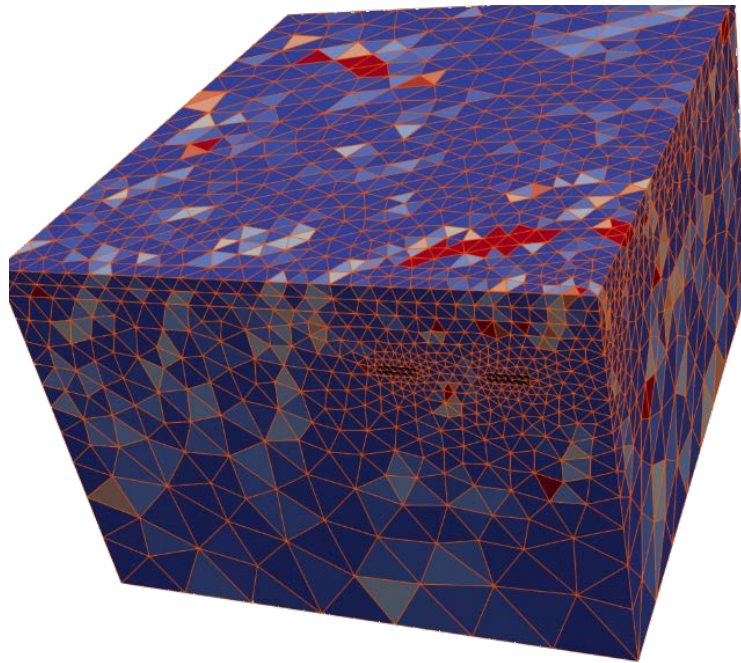
# Modellierungskonzept: Zusammenführung



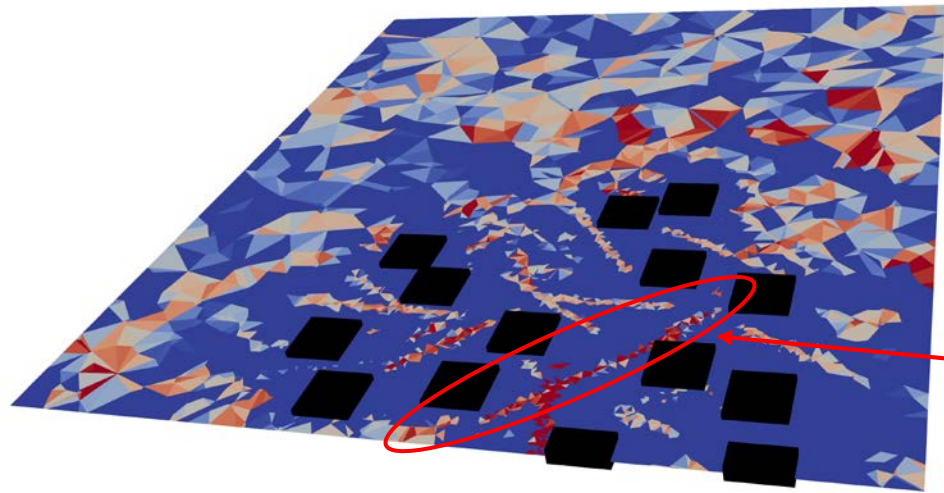
# Analyse der Permeabilitätsverteilung

3D-Kontinuumsmodell Multipler  
ewG

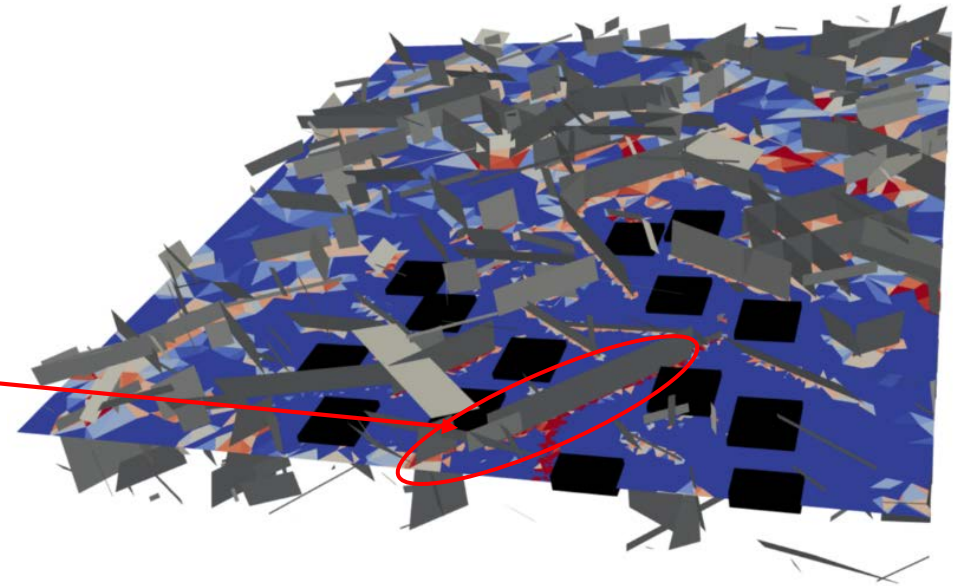
ewG Ebene ( $z \sim 204$  m)



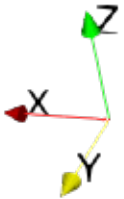
# Analyse der Permeabilitätsverteilung



1.0e-14  
5e-15  
2e-15  
1e-15  
5e-16  
2e-16  
1.0e-16  
k [m<sup>2</sup>]



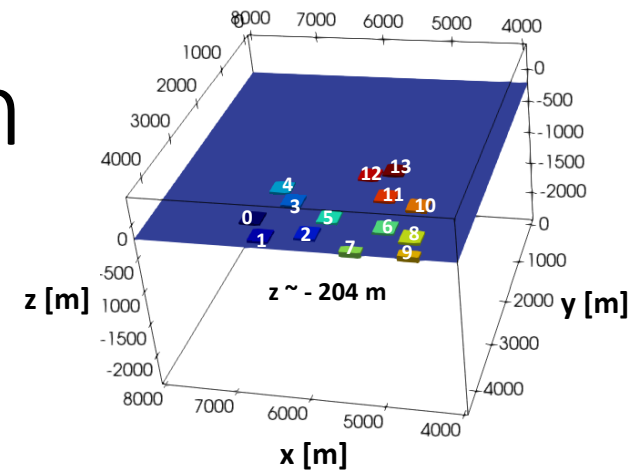
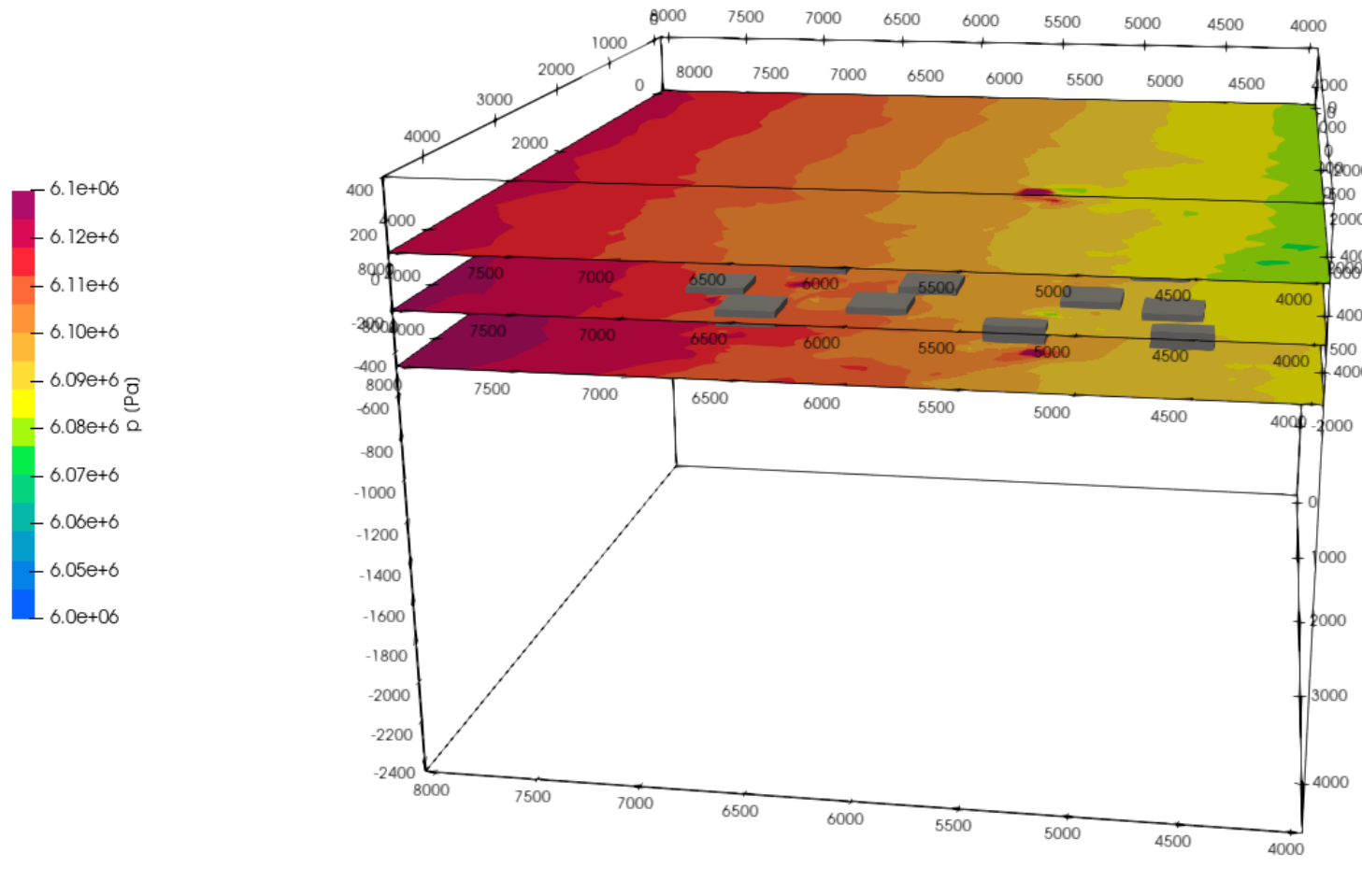
1.0e-14  
5e-15  
2e-15  
1e-15  
5e-16  
2e-16  
1.0e-16  
k [m<sup>2</sup>]





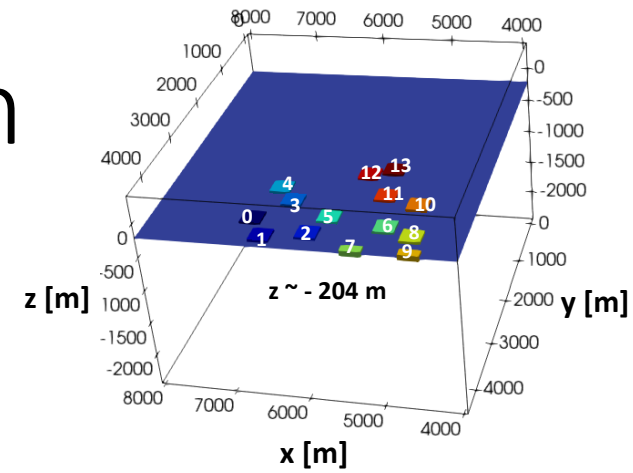
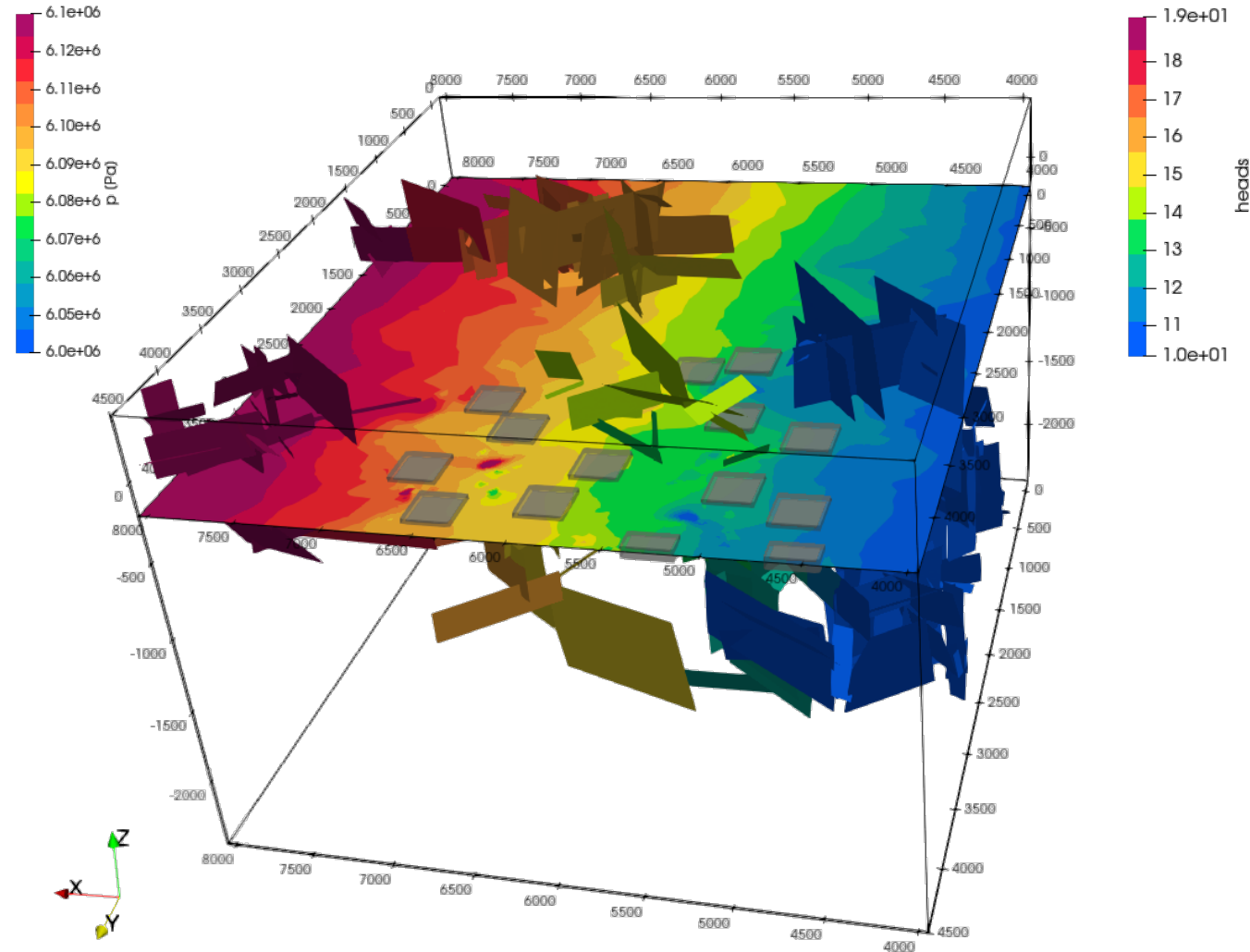
# ewGs im geklüfteten Kristallingestein

Stationäre Druckverteilung

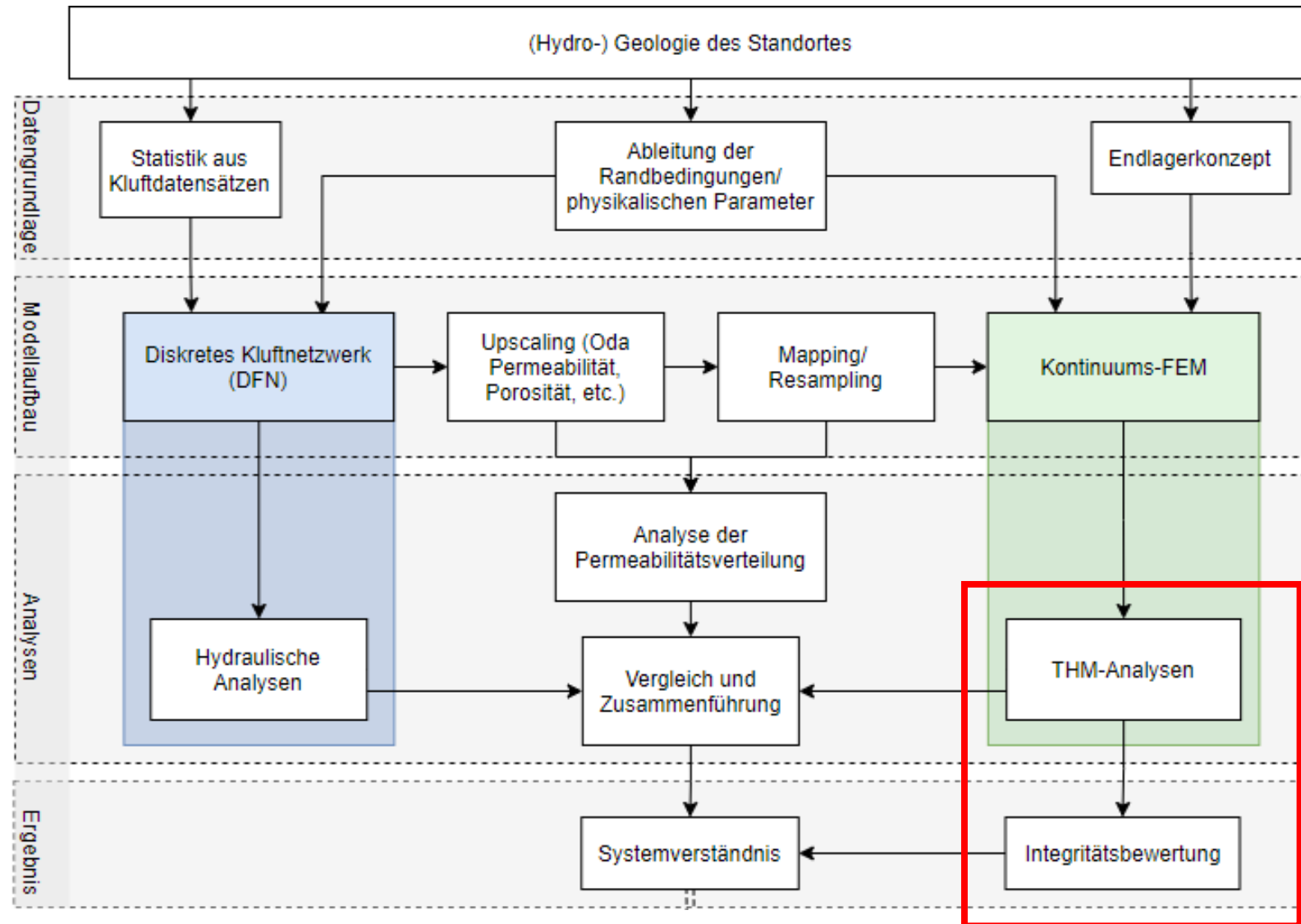


# ewGs im geklüfteten Kristallingestein

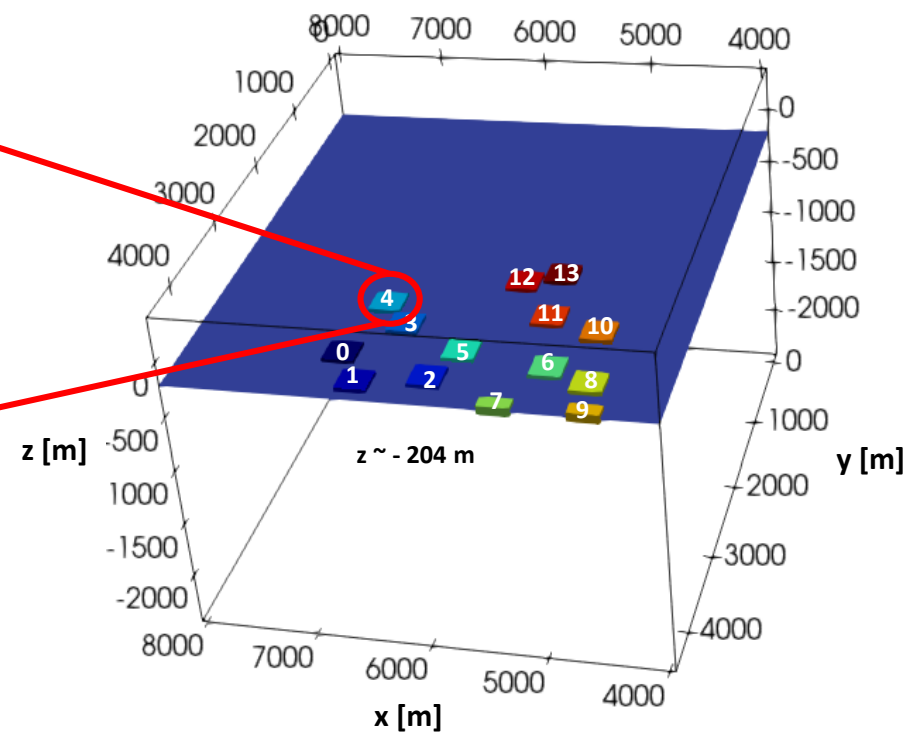
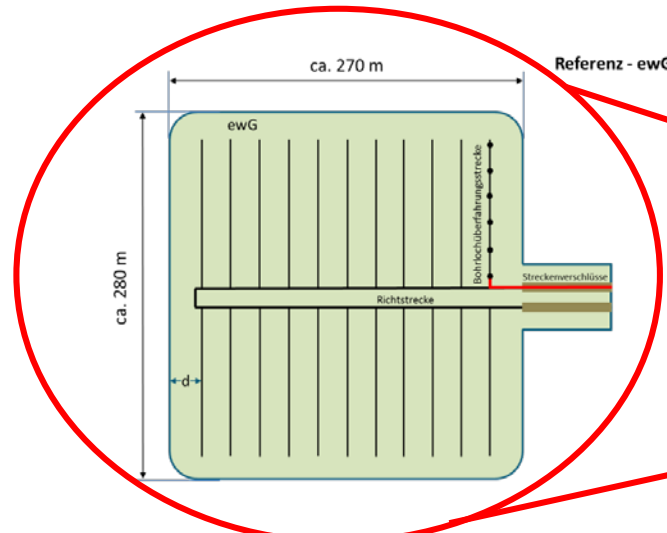
Stationäre Druckverteilung



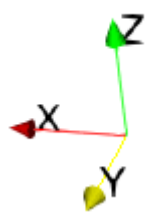
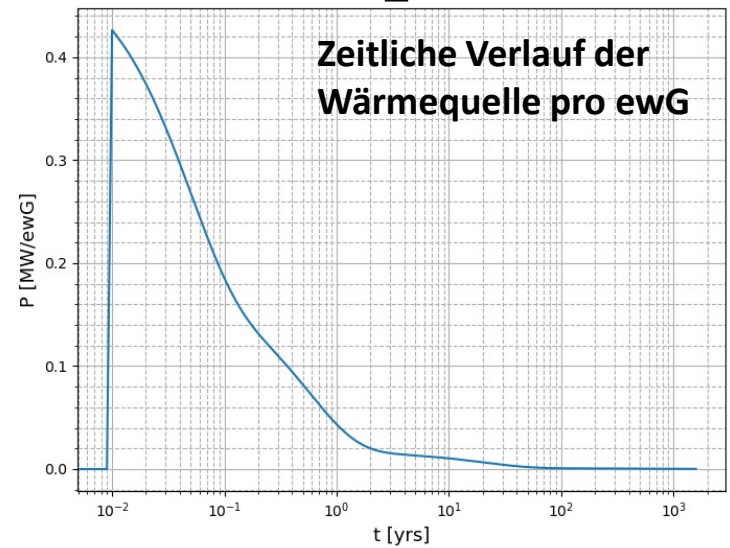
# Modellierungskonzept: THM-Analysen / Integrität



# THM-Analysen/Integritätsbewertung



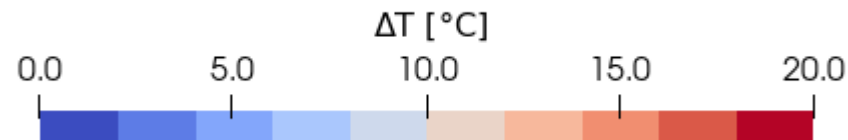
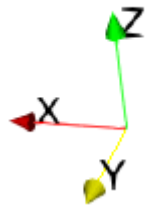
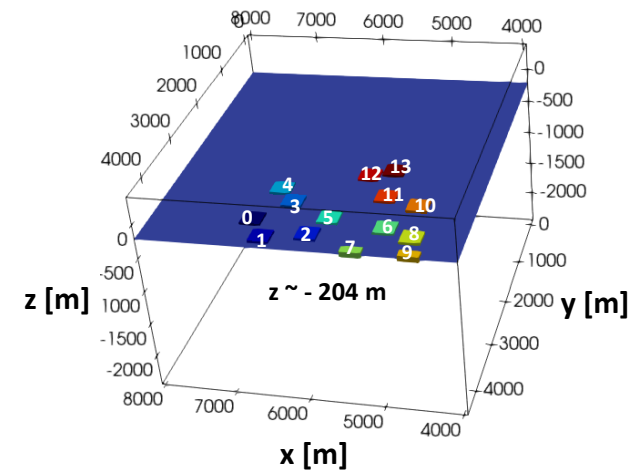
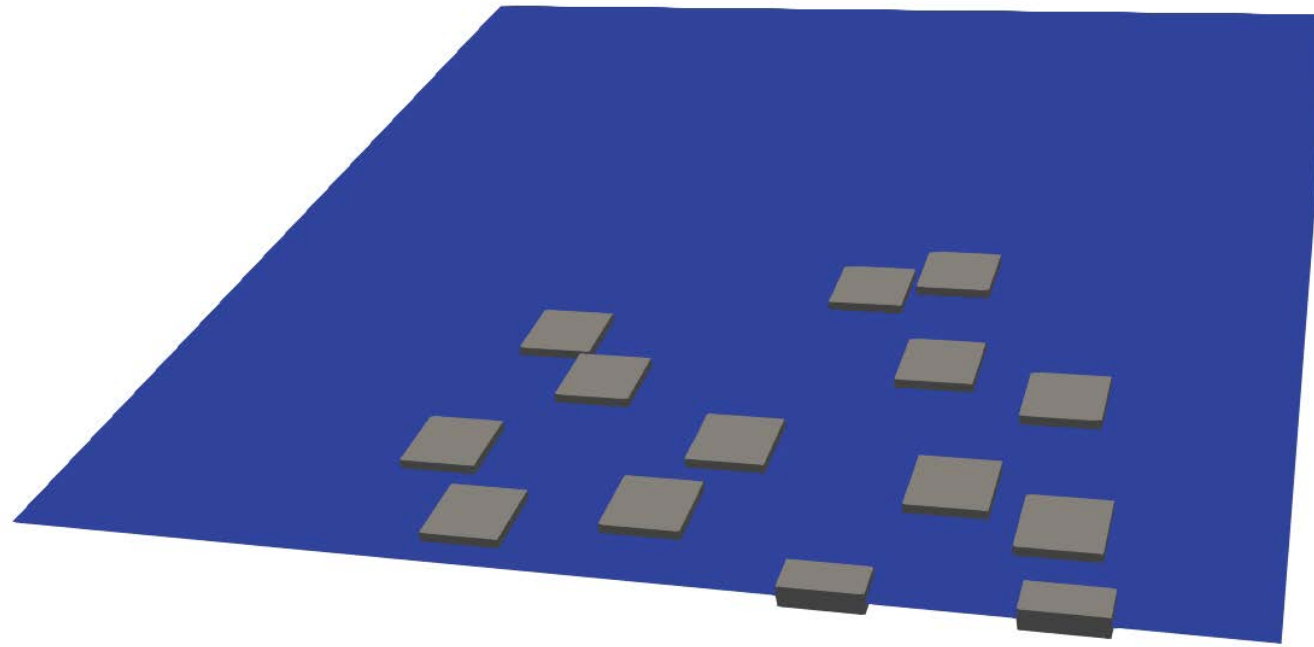
Einsetzung der Wärmequelle



# THM-Analysen/Integritätsbewertung

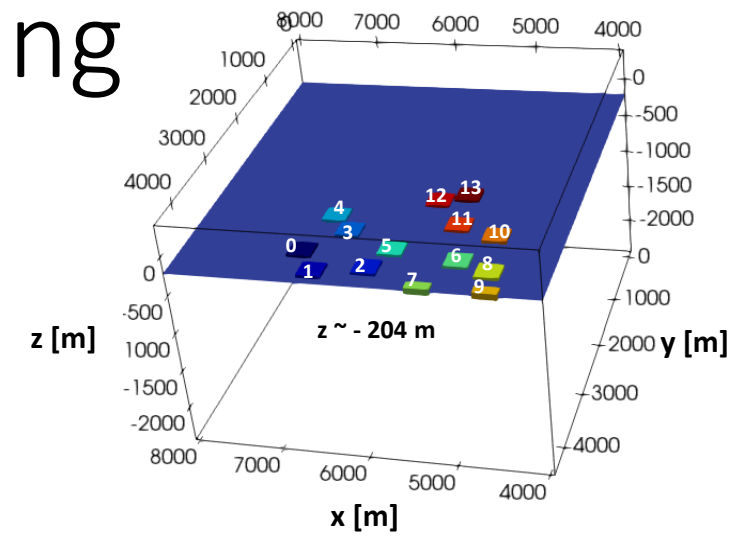
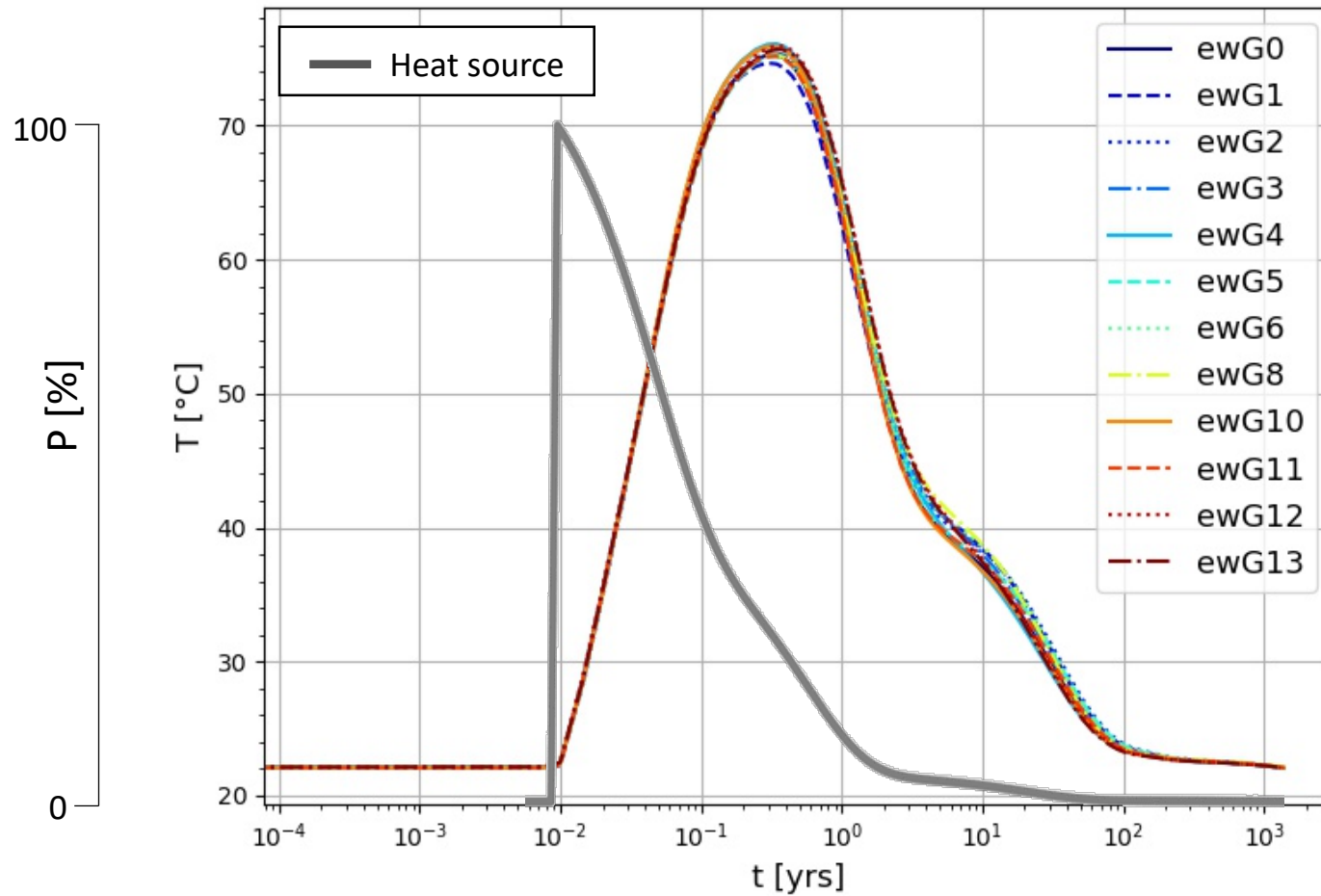
Time (yrs): ~0

Temperaturverlauf  
ewG Ebene (z ~ -204 m)



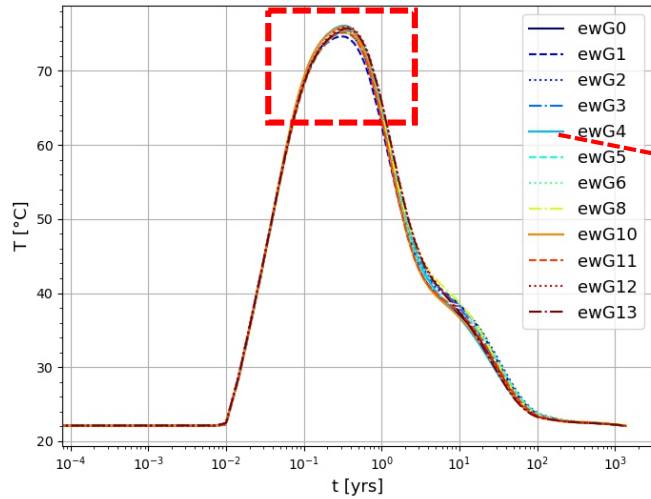
# THM-Analysen/Integritätsbewertung

Temperaturverlauf zeitlich/ewGs

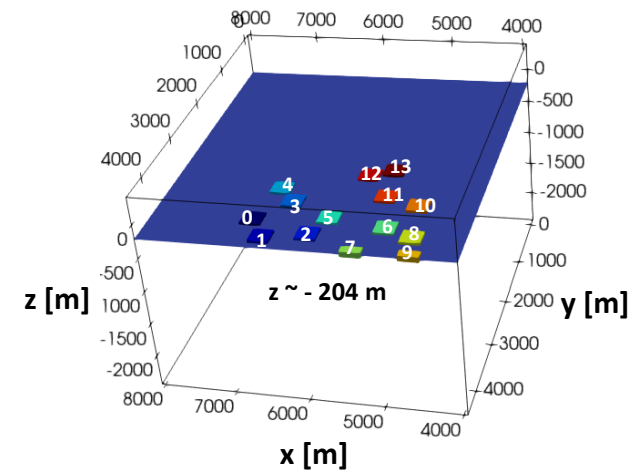
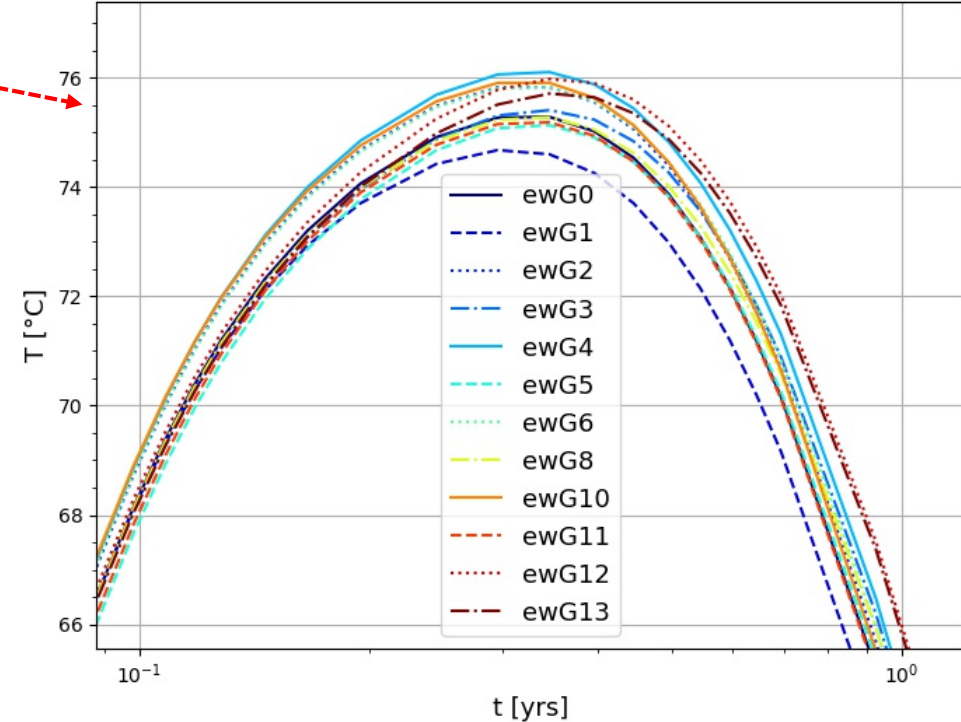


# THM-Analysen/Integritätsbewertung

## Temperatur - Überlagerungseffekte



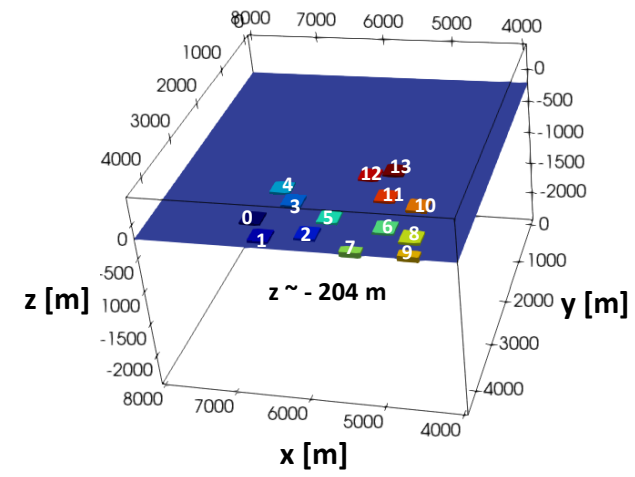
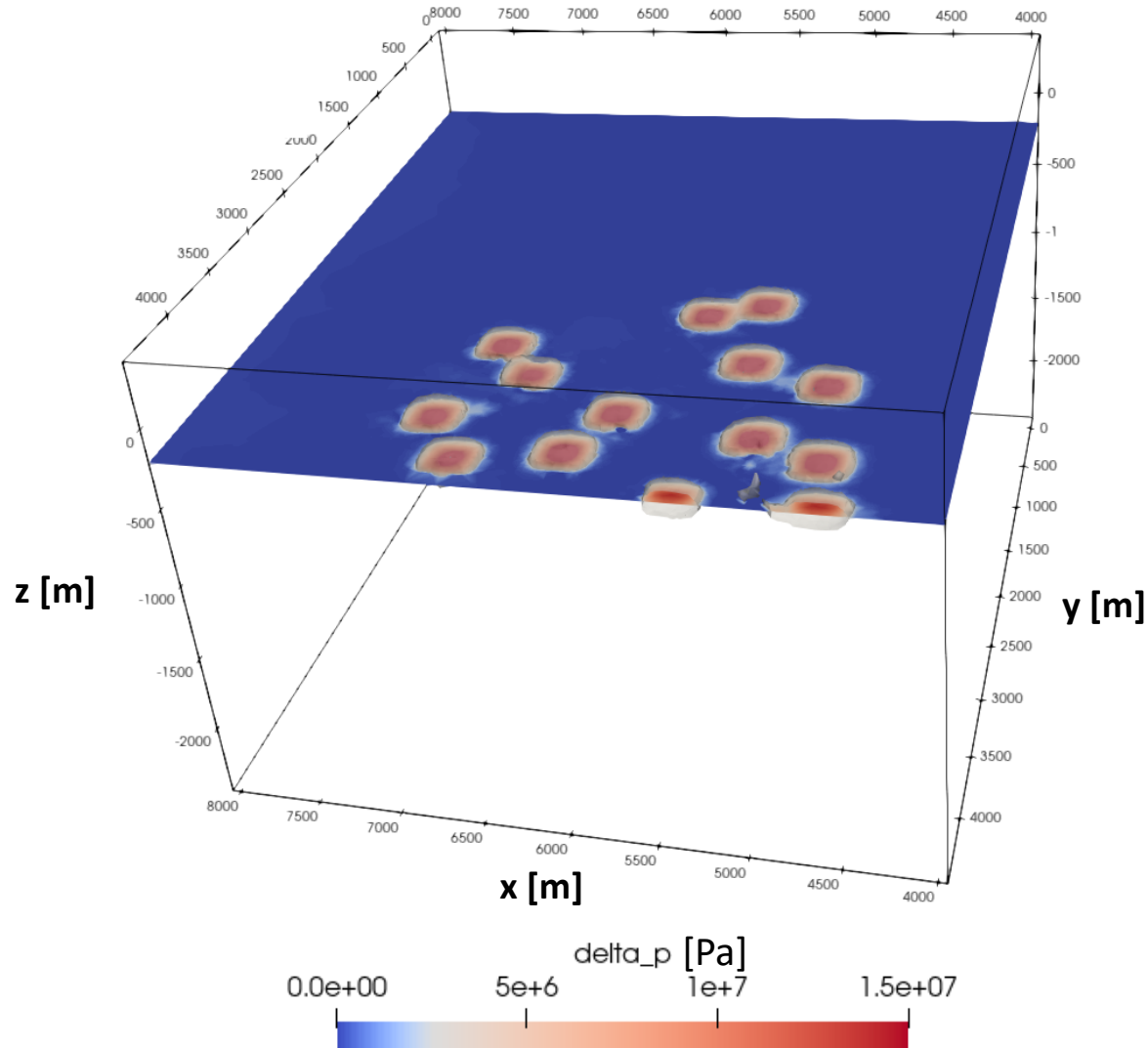
- Unterschiede in den maximalen verschmierten Temperaturen < 2°C
- Geringe gegenseitige Beeinflussung der Temperaturen in den ewGs





# THM-Analysen/Integritätsbewertung

Time (yrs): ~38

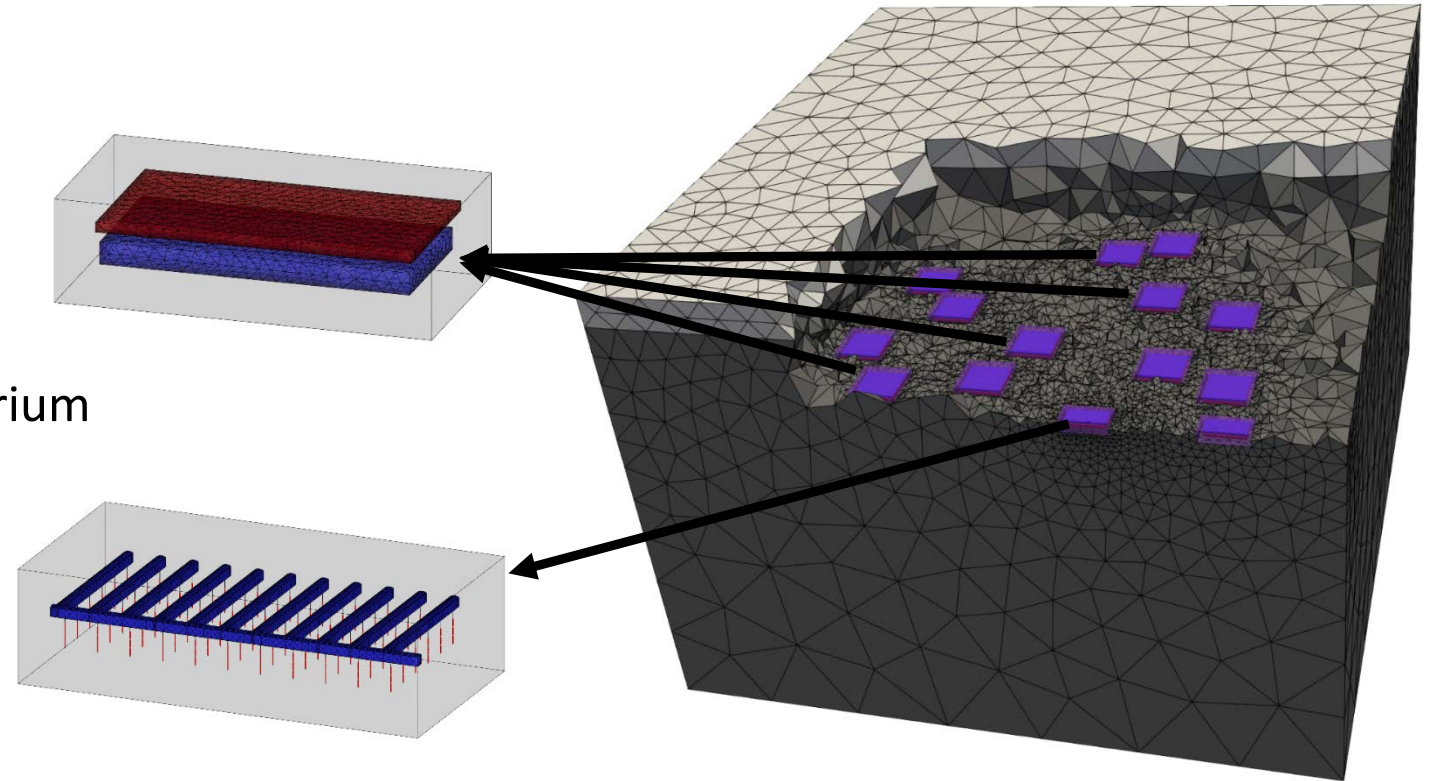




# THM-Analysen/Integritätsbewertung

In Bearbeitung: Integritätsbewertung

- Stand Integritätsbewertung:
  - Temperaturentwicklung
  - Druckentwicklung -> Fluiddruckkriterium
- Betrachtung der Mechanik
- Integritätsanalysen der ewGs
- Berücksichtigung von Nahfeldprozessen
- Eingebettetes Detailmodell



# Zusammenfassung

- Ableitung quantitativer Integritätskriterien und Anpassung an EndlSiAnfV (BMU 2020) (gemeinsam mit BGETec)
- Bestehende Konzepte zur Integritätsanalyse anwendbar für überlagernden ewG
- Modellierungskonzept für das multiple ewG-Konzept
  - THM-Analyse: DFN und Kontinuumsmodell
  - Integritätsanalyse: Kontinuumsmodell
- Workflow: Geologie -> DFN -> Upscaling -> Mapping -> THM-Kontinuumsmodell
  - Automatisierte Übertragung von Kluft-Eigenschaften, z. B. K, n, E, ...
  - Entwicklung, Verifizierung, exemplarische Anwendung
- THM-Analyse:
  - Druck- und Temperaturverteilung im geklüfteten Medium
  - Überlagerungseffekte
  - Mechanik im Aufbau

# Offene Punkte

- (Statistische) Analyse verschiedener Realisierungen der Kluftverteilung
- Ungewissheiten
- Materialmodellierung: Mechanik-Hydraulik-Wechselwirkung
- Weiterentwicklung und Spezialisierung auf Standorte
- Methodenverifizierung, Vergleich mit Alternativen