

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



[sites.google.com/view/  
bmwi-0325515-trends](https://sites.google.com/view/bmwi-0325515-trends)

FKZ: 0325515

“TRENDS” : Tracergestützte Bewertung der Nachhaltigkeit  
(Lebensdauer) einer expansiven Nutzung geothermischer  
Ressourcen im Malm-Molassebecken



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN



Der **Digital**  
Geothermie  
Kongress  
2020

***Endotracer-push-pull,  
tracergestützte Ermittlung  
präferentieller Fließwege bei  
ratenabhängiger Entwicklung***

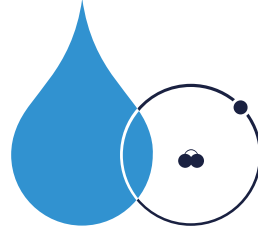
H. Behrens, J. Ghergut, M. Sauter



**DANK!**

K. Appelhans  
T. Jahrfeld  
C. Mair  
J. Pichlmaier  
M. Teifel  
F. Barenth  
D. Bruss  
C. Hecht (†)  
O. Thauer  
U. Steiner  
T. Hörbrand  
J. Hiller, J. Linde & Team  
M. Fadel  
I. Moeck  
M. Wuttke  
J. Bartels  
T. Baumann  
F. Heine  
M. Lafogler  
K. Zosseder

renerco  
plan|consult



**Hydroisotop**



**FRIEDRICH PETZOLDT GMBH**  
CHEMIE · TECHNIK · SERVICE

**PTJ**  
Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich

**ERDWERK**

**SW//M**

**TUM**



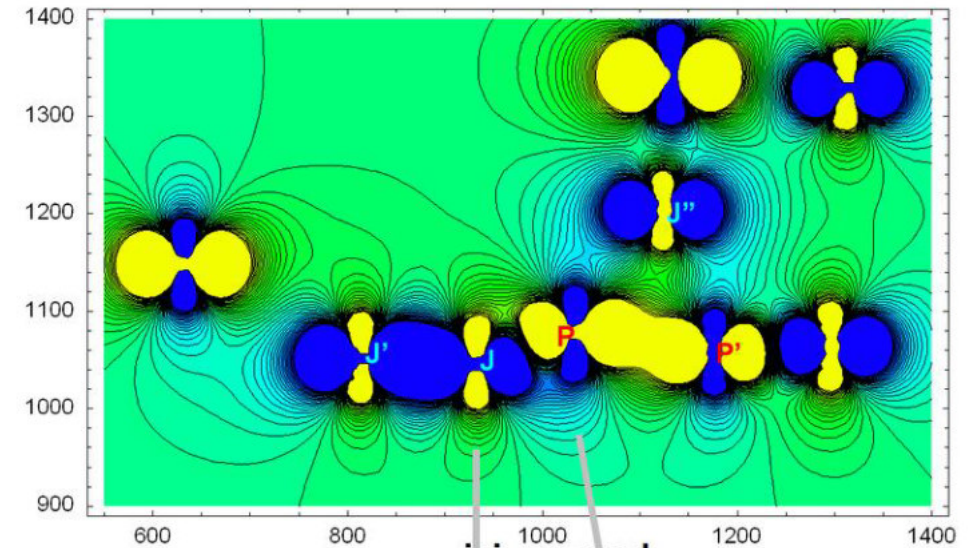
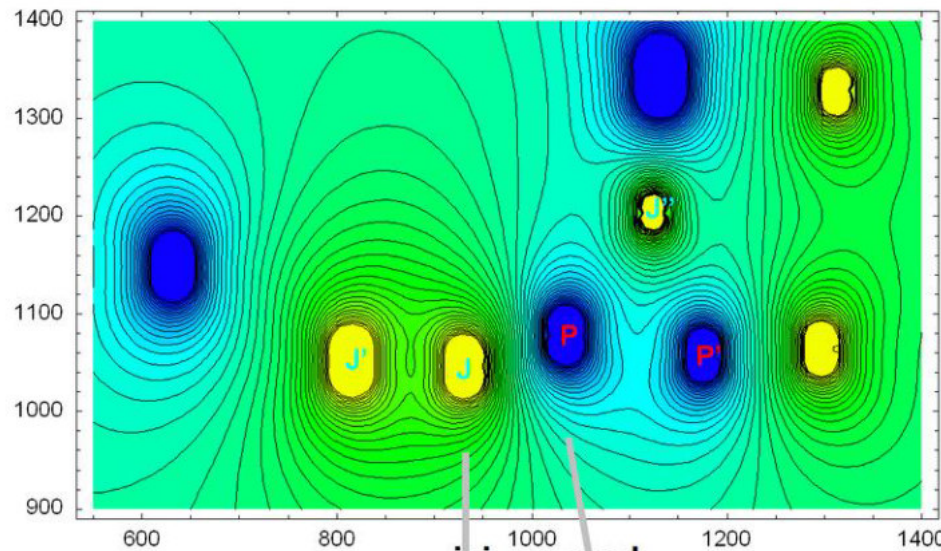
- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
  - ▶ technische
  - ▶▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
  - ▶ Tracertests
    - ▶ Befunde :
  - ▶▶ BTC, MR
  - ▶▶ deconv.
  - ▶▶ (S)SDV
  - ▶▶ nanu ... ?
  - ▶ Endo-push-pull
  - ▶ 'Inversion' FVZ → TL

BMWi – "TRENDS" : "Tracergestützte Bewertung der Nachhaltigkeit (Lebensdauer) einer expansiven Nutzung geothermischer Ressourcen im Malm-Molassebecken"

*vulgo* : wachsende Anzahl von 'Nachbarprojekten' → nehmen sich die Nachbarn gegenseitig das 'Wasser' (bzw. den Fluiddruck) und/oder die Energie weg ?  
→ gegenseitige Beeinflussung: hydraulisch, thermisch (, hydrochemisch) ?

Fluid-induced changes,  $\delta d$  (MC, MCF) for the same geothermal-well doublet in a homogeneous, unbounded reservoir, in the presence of 7 further injection and production wells, at a very early stage (just after the onset of forced-gradient circulation).

... *ibid.*, at late stages of reservoir operation.



Behrens et al.  
SGW 2020



► Ziele

► übergeordnete

► technische

►► thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?

► Tracertests  
► Befunde :

►► BTC, MR

►► deconv.

►► (S)SDV

►► nanu ... ?

► Endo-push-pull

► 'Inversion'  
FVZ → TL

BMWi – "TRENDS" : "Tracergestützte Bewertung der Nachhaltigkeit (Lebensdauer) einer expansiven Nutzung geothermischer Ressourcen im Malm-Molassebecken"

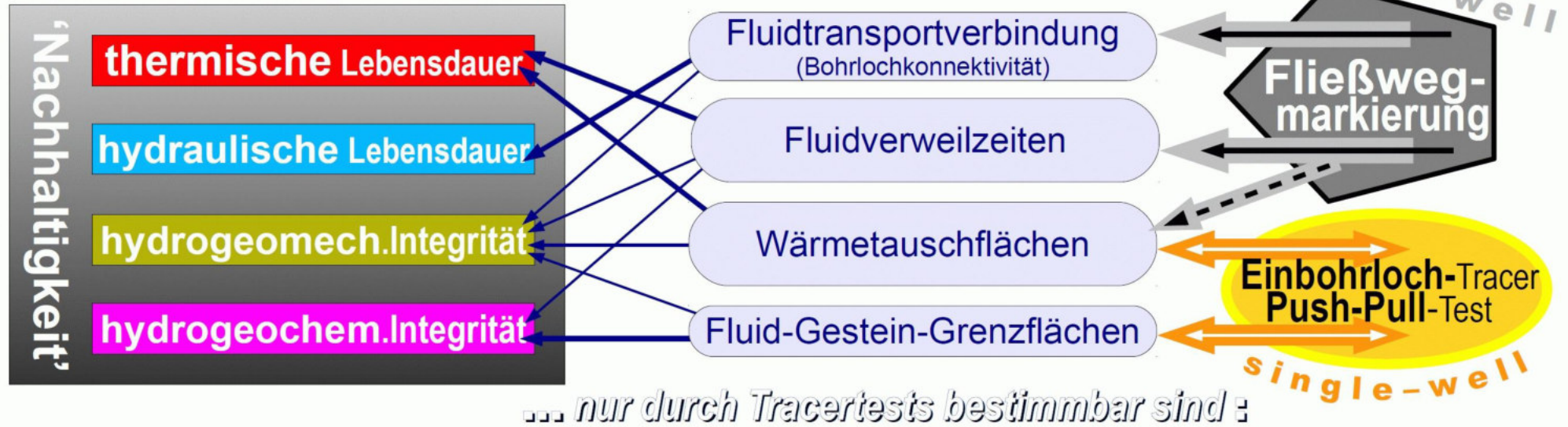
*vulgo* : wachsende Anzahl von 'Nachbarprojekten' → nehmen sich die Nachbarn gegenseitig das 'Wasser' (bzw. den Fluiddruck) und/oder die Energie weg ?  
→ gegenseitige Beeinflussung: hydraulisch, **thermisch** (, hydrochemisch) ?

... auch ohne 'Nachbarn' ...

... 'Lebensdauer' hängt auf jeden Fall von Fluidverweilzeiten ab ...

... welche mittels Tracertests zu ermitteln sind

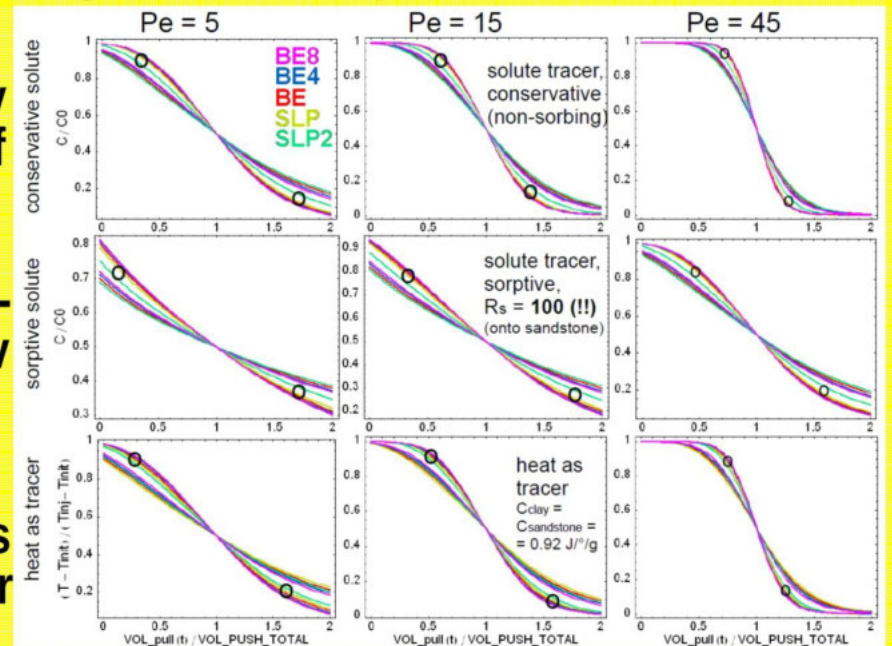
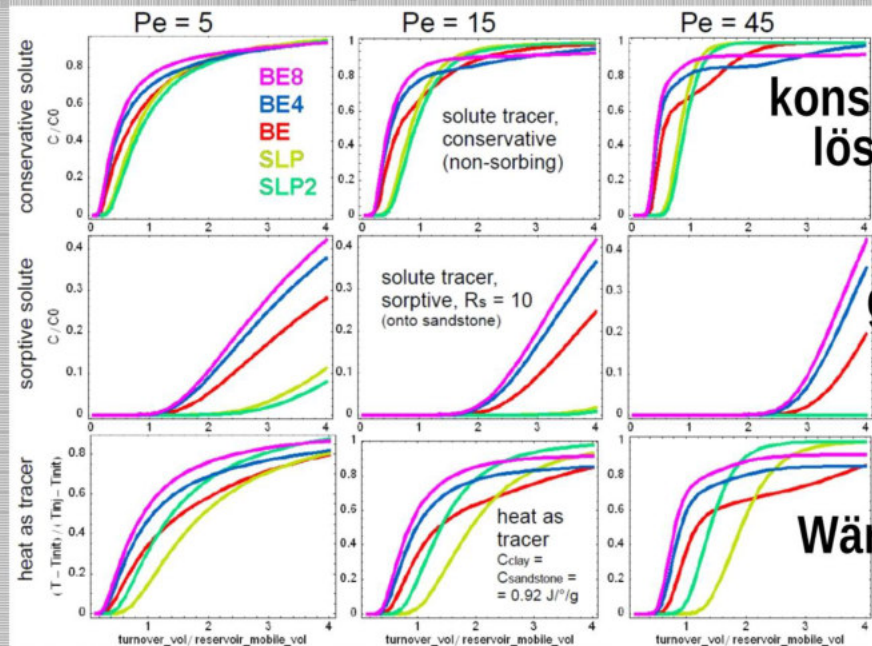
Lebensdauerkontrollierende Georeservoirparameter, die ...



... nur durch Tracertests bestimmbar sind :

**inter-well (Fließwegmarkierung)**

**single-well (Einbohrlochrückhol.)**



- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
  - ▶ technische
  - ▶▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ Tracertests
  - ▶ Befunde :
    - ▶▶ BTC, MR
    - ▶▶ deconv.
    - ▶▶ (S)SDV
    - ▶▶ nanu ... ?
  - ▶ Endo-push-pull
  - ▶ 'Inversion' FVZ → TL



► Ziele

► übergeordnete

► technische

►► thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?

► Tracertests  
► Befunde :

►► BTC, MR

►► deconv.

►► (S)SDV

►► nanu ... ?

► Endo-push-pull

► 'Inversion'  
FVZ → TL

BMWi – "TRENDS" : "Tracergestützte Bewertung der Nachhaltigkeit (Lebensdauer) einer expansiven Nutzung geothermischer Ressourcen im Malm-Molassebecken"

*vulgo* : wachsende Anzahl von 'Nachbarprojekten' → nehmen sich die Nachbarn gegenseitig das 'Wasser' (bzw. den Fluiddruck) und/oder die Energie weg ?  
→ gegenseitige Beeinflussung: hydraulisch, **thermisch** (, hydrochemisch) ?

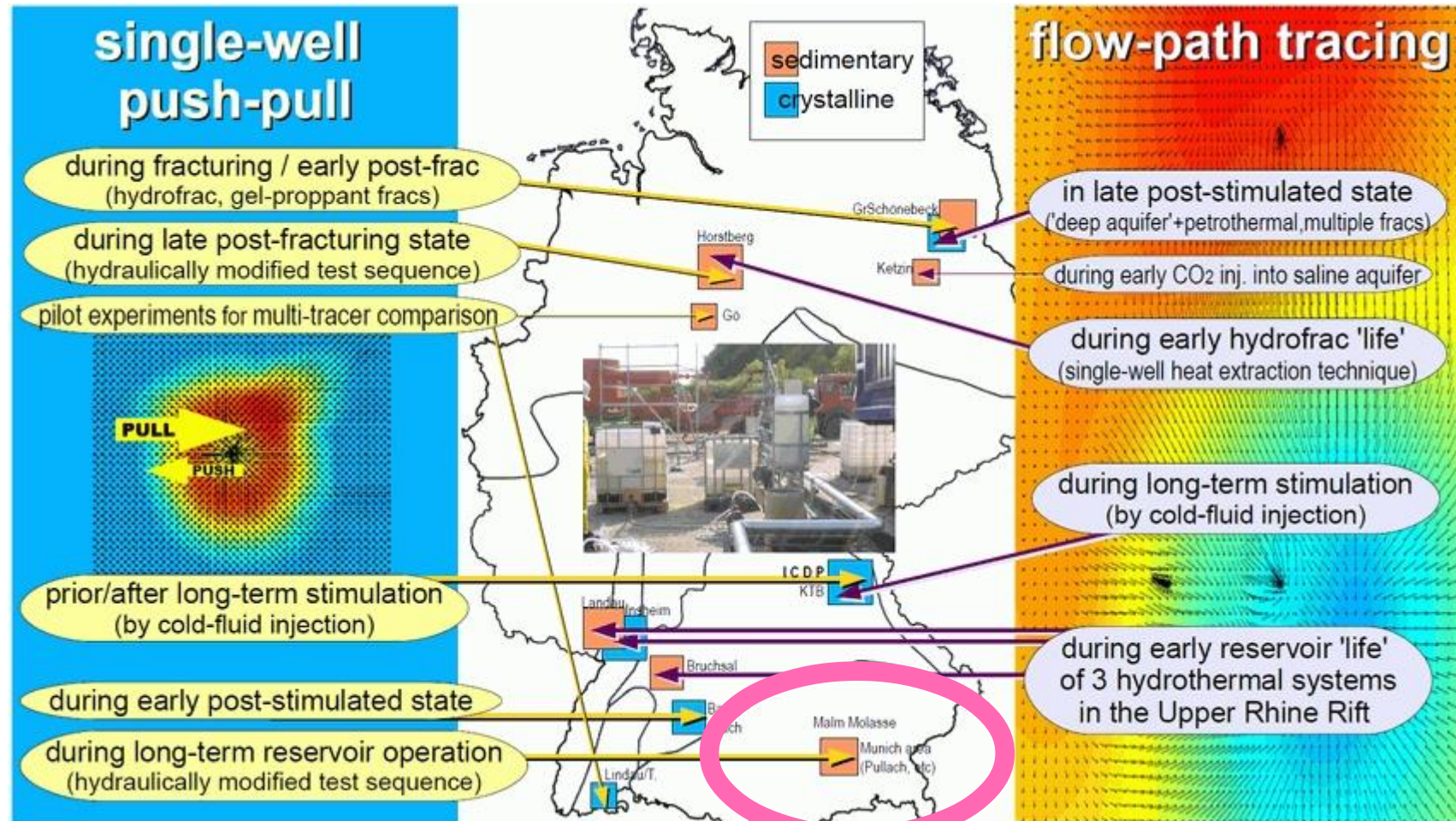
... auch ohne 'Nachbarn' ...

... 'Lebensdauer' hängt auf jeden Fall von Fluidverweilzeiten ab ...

... welche mittels Tracertests zu ermitteln sind

BMWi – “TRENDS” : “Tracergestützte Bewertung der Nachhaltigkeit (Lebensdauer) einer expansiven Nutzung geothermischer Ressourcen im Malm-Molassebecken”

*vulgo* : wachsende Anzahl von ‘Nachbarprojekten’ → nehmen sich die Nachbarn gegenseitig das ‘Wasser’ (bzw. den Fluiddruck) und/oder die Energie weg ?  
→ gegenseitige Beeinflussung: hydraulisch, **thermisch** (, hydrochemisch) ?



- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
  - ▶ technische
  - ▶▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ Tracertests
  - ▶ Befunde :
  - ▶▶ BTC, MR
  - ▶▶ deconv.
  - ▶▶ (S)SDV
  - ▶▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ 'Inversion' FVZ → TL

Was heißt  
“thermischer  
Durchbruch”?

wo: Dublette im Malm,  
strukturgeol. u. hydrogeol.  
Charakterisierung in  
Präsentation von M. Fadel  
im *Science-Bar-Wettbewerb*

- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ technische
- ▶ ▶ **thermischer Durchbruch od. ‘stinknormale’ Abkühlung ?**
- ▶ Tracertests
  - ▶ Befunde :
- ▶ ▶ BTC, MR
- ▶ ▶ deconv.
- ▶ ▶ (S)SDV
- ▶ ▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ ‘Inversion’  
FVZ → TL



- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ technische
- ▶▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ Tracertests
  - ▶ Befunde :
- ▶▶ BTC, MR
- ▶▶ deconv.
- ▶▶ (S)SDV
- ▶▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ 'Inversion'
  - FVZ → TL

## Was heißt "thermischer Durchbruch"?

### hydro- vs. petrothermal ?

- ▶ (Matrix-) Permeabilität
- ▶ c/d Strömung
- ▶ Kompetenz
- ▶ ...

### ▶ longit. vs. transv. WT

- ▶ TL ~ FVZ 1 or 2

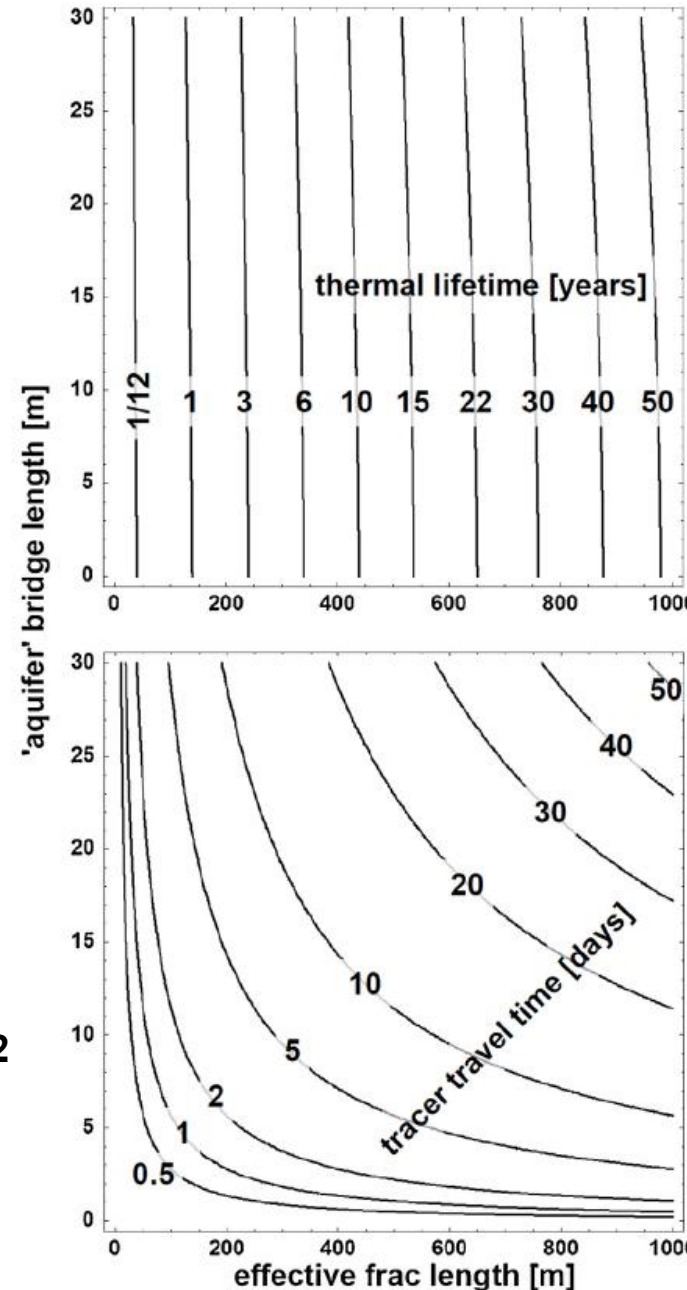


Fig. 3. Isolines (contour plots) of thermal lifetime and of tracers' advective travel time as a function of the 'aquifer' bridge length ( $X_a$ ) and the effective frac length

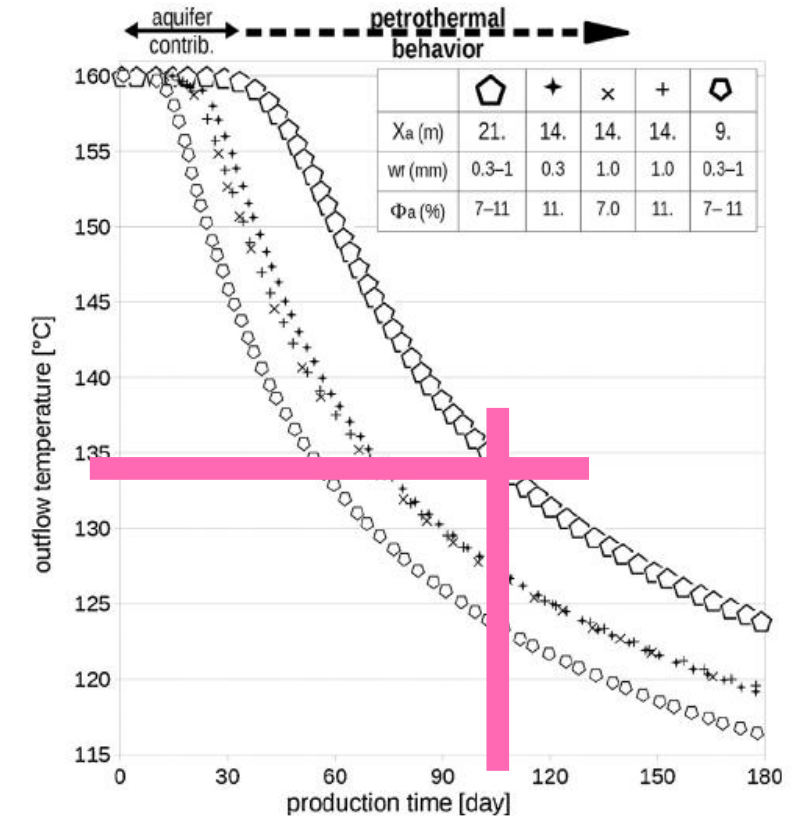


Fig. 4. Numerical simulations of outflow water temperature history for the Horstberg FC scheme, assuming various values for the transport-effective fracture aperture  $w_f$ , the 'aquifer' bridge length  $X_a$ , and the 'aquifer' layer porosity  $\Phi_a$ .

nach dieser Definition werden 'petrothermale Systeme' immer einen "thermischen Durchbruch" bereits nach etwa einem Drittel ihrer eigentlich intendierten 'Lebensdauer' zeigen; entscheidend: nicht die Zeit sondern die Anfangstemperatur!

- ▶ Ziele
- ▶ **übergeordnete**
- ▶ technische
- ▶▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ Tracertests
  - ▶ Befunde :
- ▶▶ BTC, MR
- ▶▶ deconv.
- ▶▶ (S)SDV
- ▶▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ 'Inversion'  
FVZ → TL

## Übergeordnete Zielsetzungen:

- tracergestützte Reservoirentwicklungsprognose, Fortschreibung des Wärmebergbaumodells
- begleitende Auswertung älterer und neuerer (3D-)seismischer Erhebungen im Projektgebiet (ggf.: tracergestützte Identifizierung räumlich-unterdrückter Karstgebilde)
- tracergestützte Planung der weiteren Reservoirentwicklung (Optimierung des Betriebs, Redimensionierung des Reservoirs bzw. Erweiterung um neue Bohrung, Wahl der Bohrlokation, Empfehlungen betreffs Pumprate bzw. Absenkung förderseitig)

- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ **technische**
- ▶ ▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ Tracertests
  - ▶ Befunde :
- ▶ ▶ BTC, MR
- ▶ ▶ deconv.
- ▶ ▶ (S)SDV
- ▶ ▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ 'Inversion' FVZ → TL

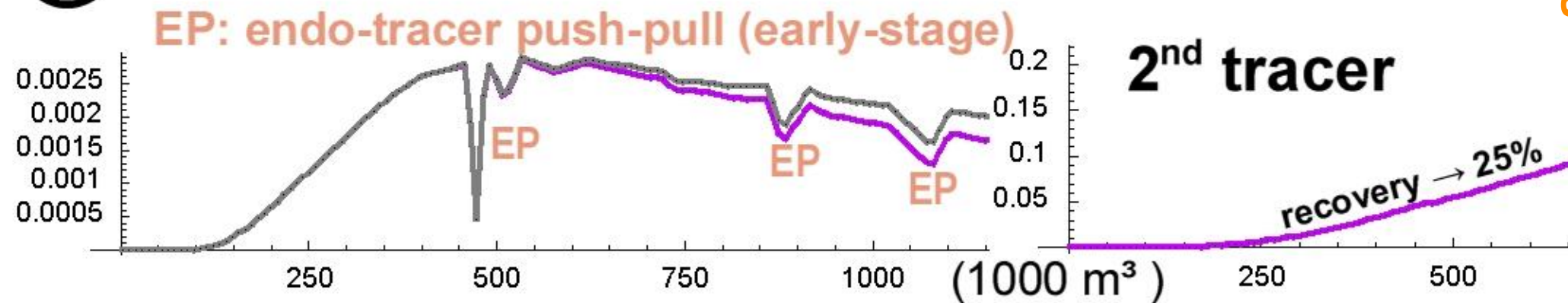
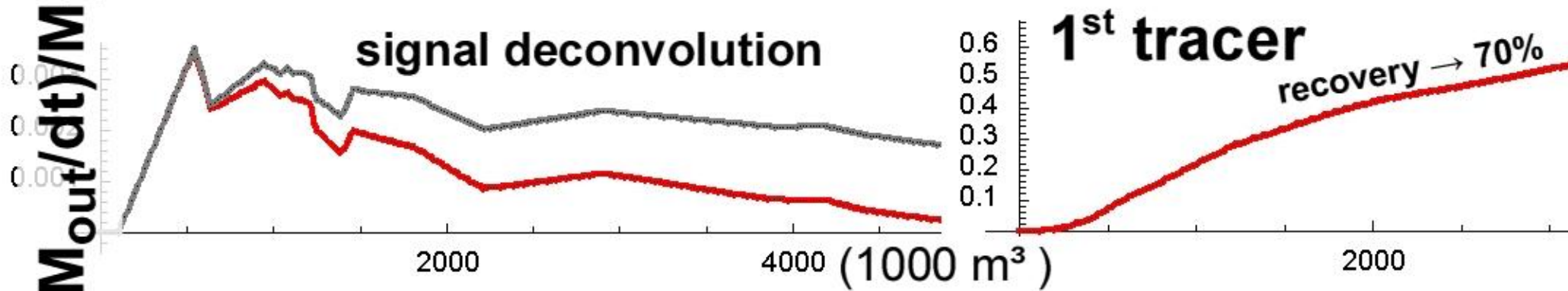
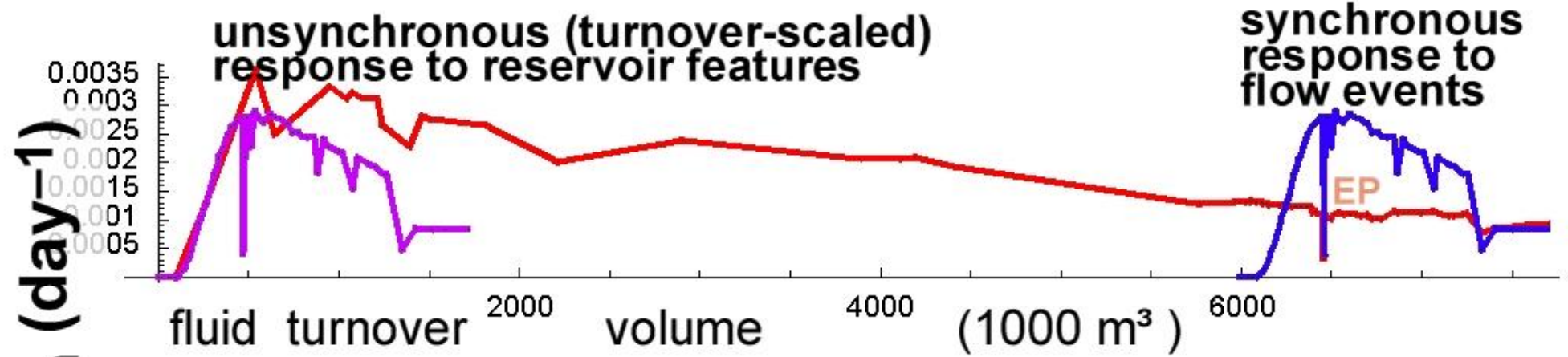
technische Tracertestziele, aktuell:

Ermittlung der (ggf. fließratenabhängigen) Fluidverweilzeit- und Speicher-Durchfluss-Verteilung im heterogenen Reservoir, mit besonderem Augenmerk auf räumlich-begrenzte Permeabilitätsfenster (diskrete, kluftähnlich-transportwirksame Karstgebilde?),

als Grundlage zur Konzeptualisierung (Doppelkontinuum: wohl Doppelporositäts- u. annähernd Monopermeabilitäts-) und Kalibrierung eines Strömungs- und Transportmodells



- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ technische
- ▶ ▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ ▶ Tracertests
- ▶ ▶ Befunde :
- ▶ ▶ ▶ BTC, MR
- ▶ ▶ ▶ deconv.
- ▶ ▶ ▶ (S)SDV
- ▶ ▶ ▶ nanu ... ?
- ▶ ▶ Endo-push-pull
- ▶ ▶ 'Inversion' FVZ → TL

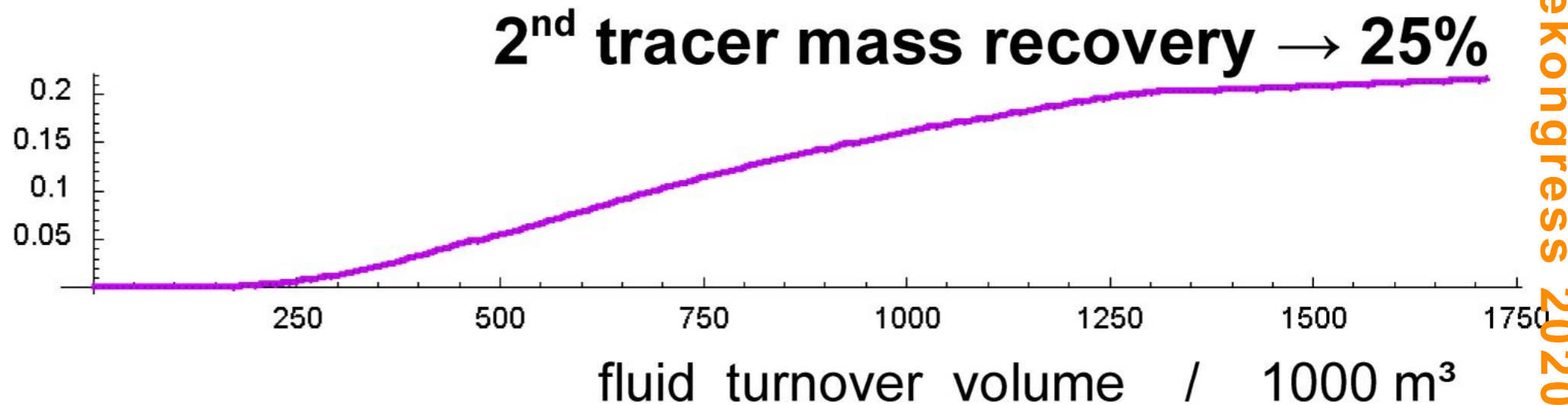
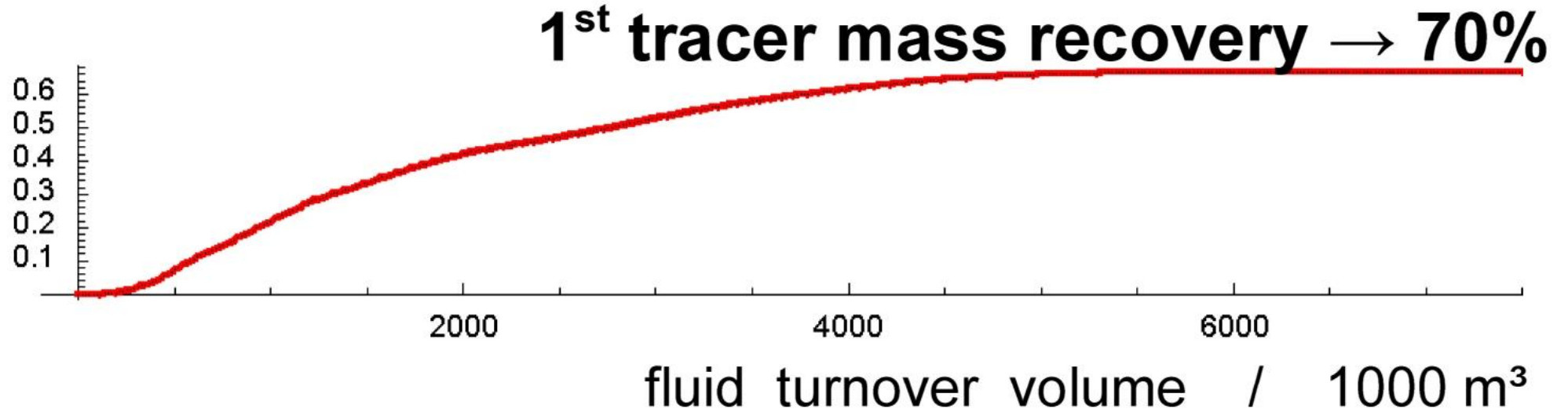




- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ technische
- ▶ ▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?

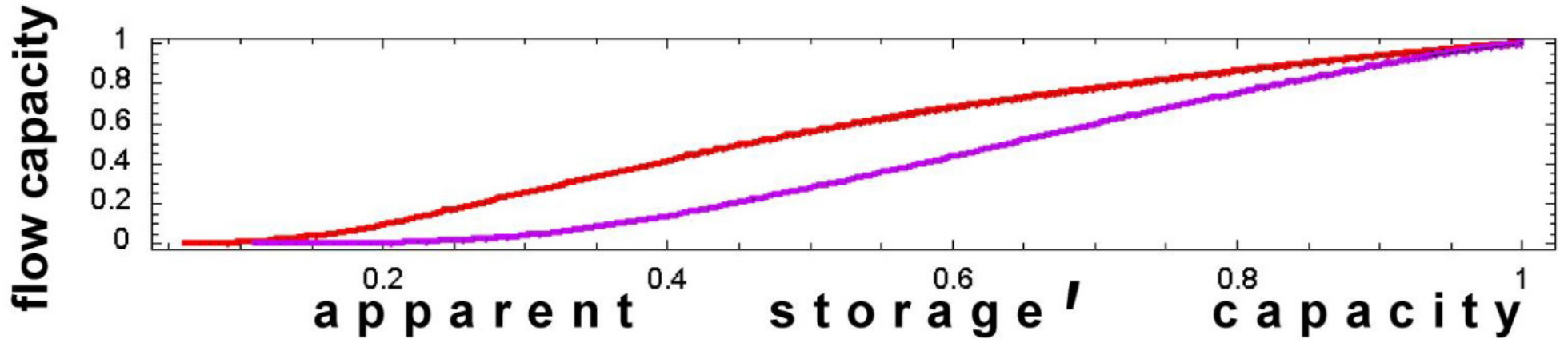
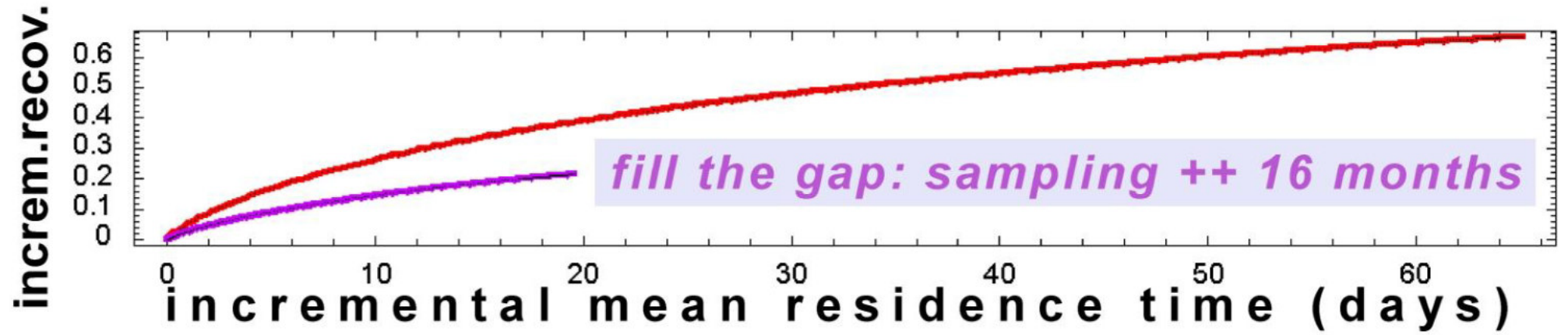
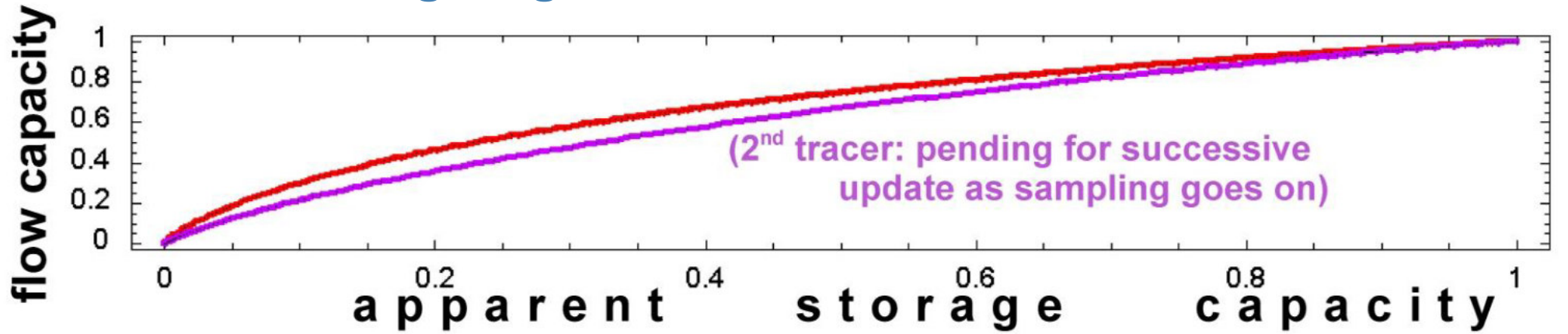
▶ **Tracertests**  
▶ **Befunde :**

- ▶ ▶ BTC, MR
- ▶ ▶ deconv.
- ▶ ▶ (S)SDV
- ▶ ▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ 'Inversion' FVZ → TL

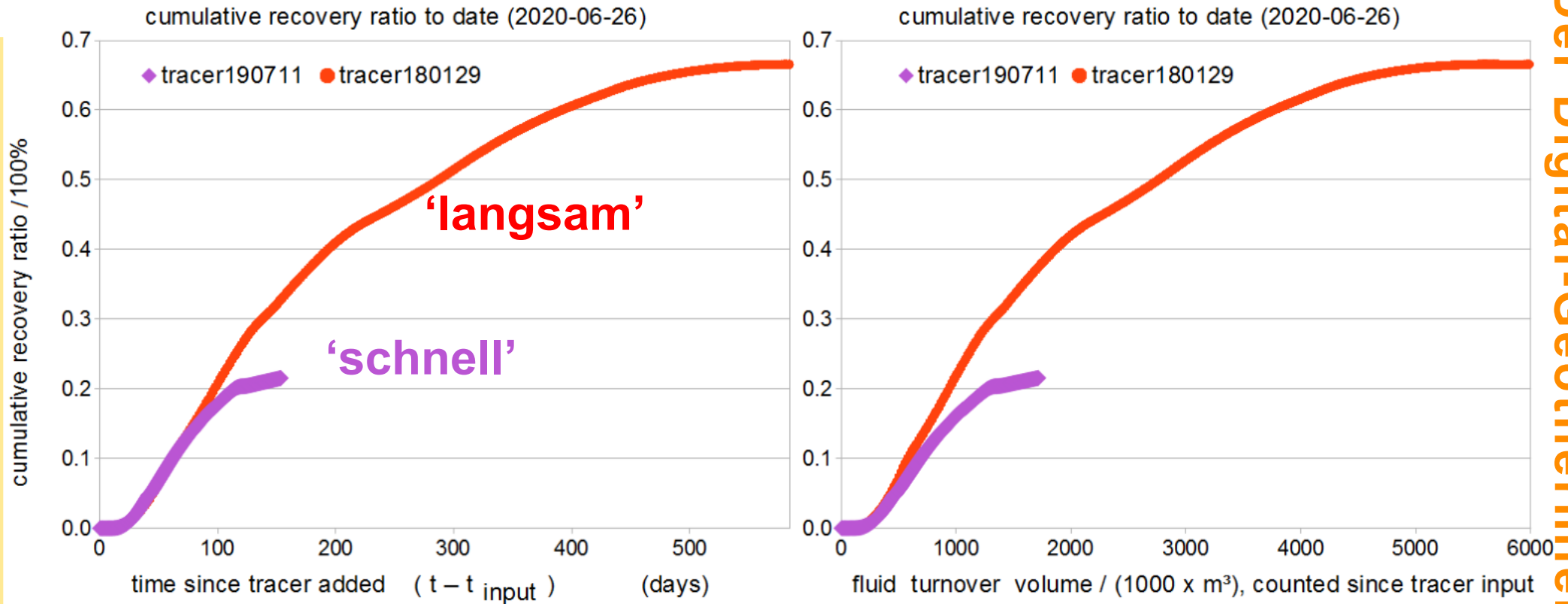




- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ technische
- ▶▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶▶ Tracertests
  - ▶ Befunde :
  - ▶▶ BTC, MR
  - ▶▶ deconv.
  - ▶▶ (S)SDV
  - ▶▶ nanu ... ?
  - ▶ Endo-push-pull
  - ▶ 'Inversion' FVZ → TL

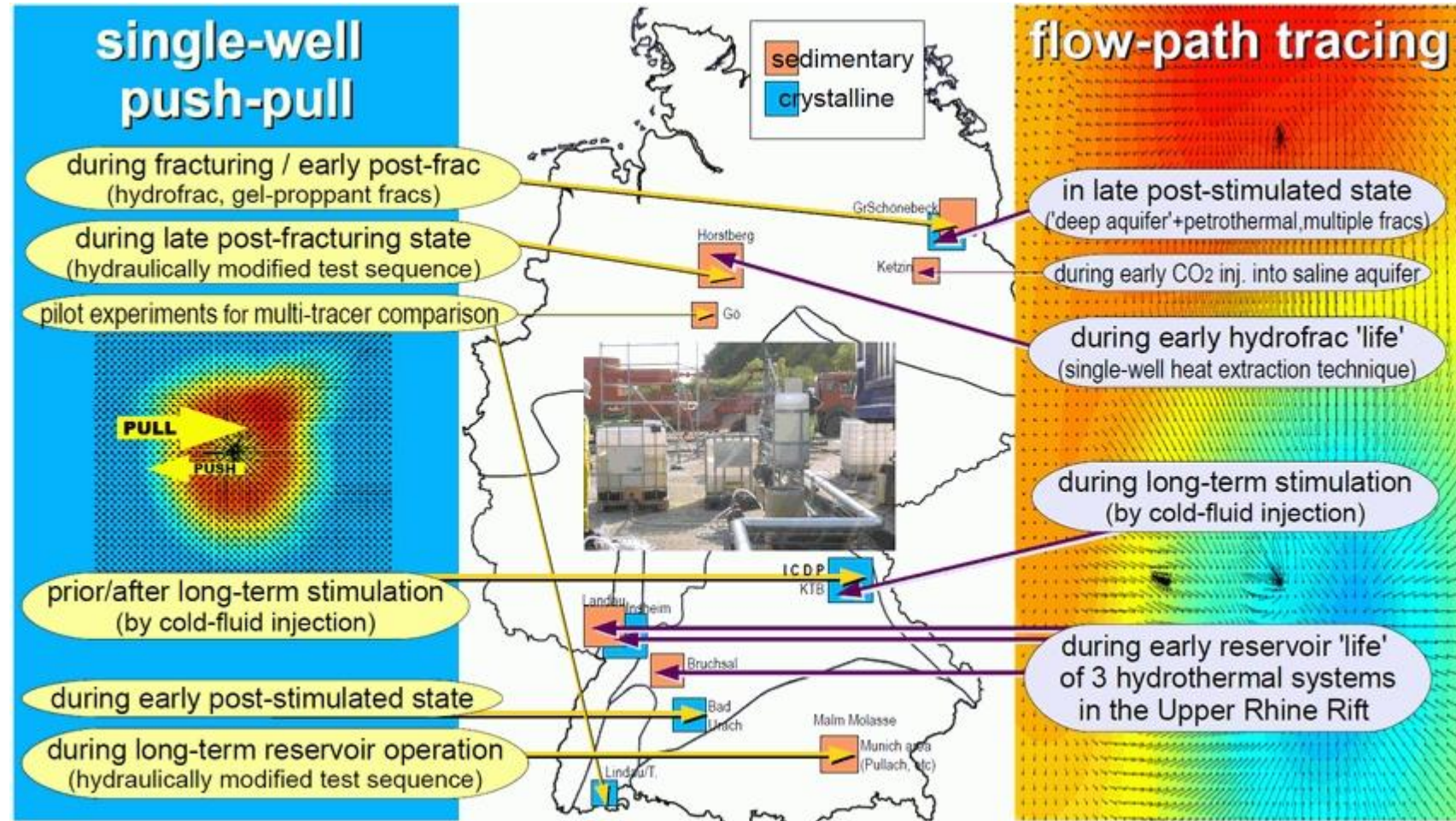


- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ technische
- ▶ ▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ ▶ Tracertests
  - ▶ Befunde :
- ▶ ▶ BTC, MR
- ▶ ▶ deconv.
- ▶ ▶ (S)SDV
- ▶ ▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ 'Inversion' FVZ → TL



- ▶ Fließwege gleichgeblieben?  
→ zweiter Tracer müsste 'schneller' kommen!
- ▶ Tracer 'baut sich ab'? (nicht-konservativ?)
- ▶ Fließraten stimmen nicht?

- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ technische
- ▶ ▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ **Tracertests**
- ▶ **Befunde :**
- ▶ ▶ BTC, MR
- ▶ ▶ deconv.
- ▶ ▶ (S)SDV
- ▶ ▶ **nanu ... ?**
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ 'Inversion' FVZ → TL



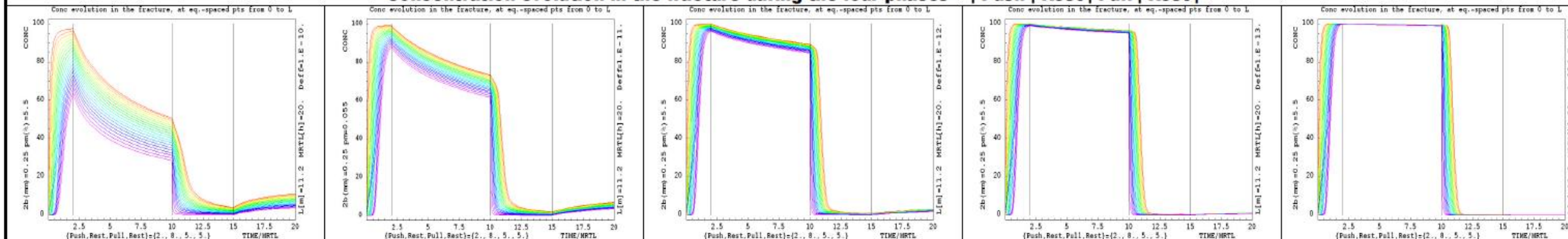


- ▶ Ziele
- ▶ übergeordnete
- ▶ technische
  - ▶ ▶ thermischer Durchbruch od. 'stinknormale' Abkühlung ?
- ▶ **Tracertests**
  - ▶ **Befunde :**
  - ▶ ▶ BTC, MR
  - ▶ ▶ deconv.
  - ▶ ▶ (S)SDV
  - ▶ ▶ nanu ... ?
- ▶ **Endo-push-pull**
- ▶ 'Inversion'  
FVZ → TL

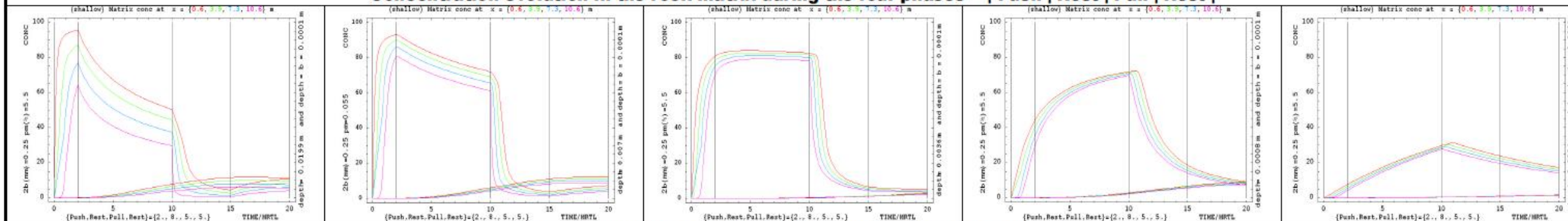
Als '**Endotracer**' bezeichnen wir generell Fluidinhaltsstoffe oder sonstige eindeutig detektierbare physikochemische Merkmale (Behrens / Ghergut et al. 2014, 2019), deren Eintrag ins Reservoir in etwa dem eines künstlichen Tracers mit räumlich-zeitlich eng begrenzter Zugabe entspricht, deren langfristige räumliche Verteilung im System hingegen mehr derjenigen eines natürlichen Tracers mit diffusem Eintrag ähnelt.

Im Rahmen der aktuellen Thermalwasserkreislaufmarkierung bieten als solche **die bereits zirkulierenden Tracer** ab einem gewissen Zeitpunkt im Tailingregime eine elegante Möglichkeit, zwischen dem Anteil physikochemisch-bedingter und dem Anteil Georeservoir(strömungs)-bedingter Unterschiede im Verhalten der zwei nacheinander (vor bzw. nach Fließratenerhöhung) eingesetzten Tracerspezies (aromatische Sulfonsäuren NDS, PTS) an der SDV-Verschiebung ihrer Signale quantitativ differenzieren zu können.

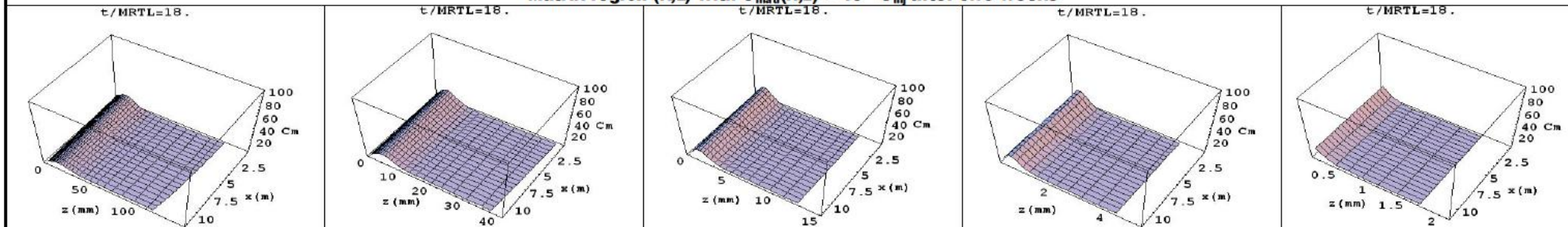
### Concentration evolution in the fracture during the four phases | Push | Rest | Pull | Rest |



### Concentration evolution in the rock matrix during the four phases | Push | Rest | Pull | Rest |



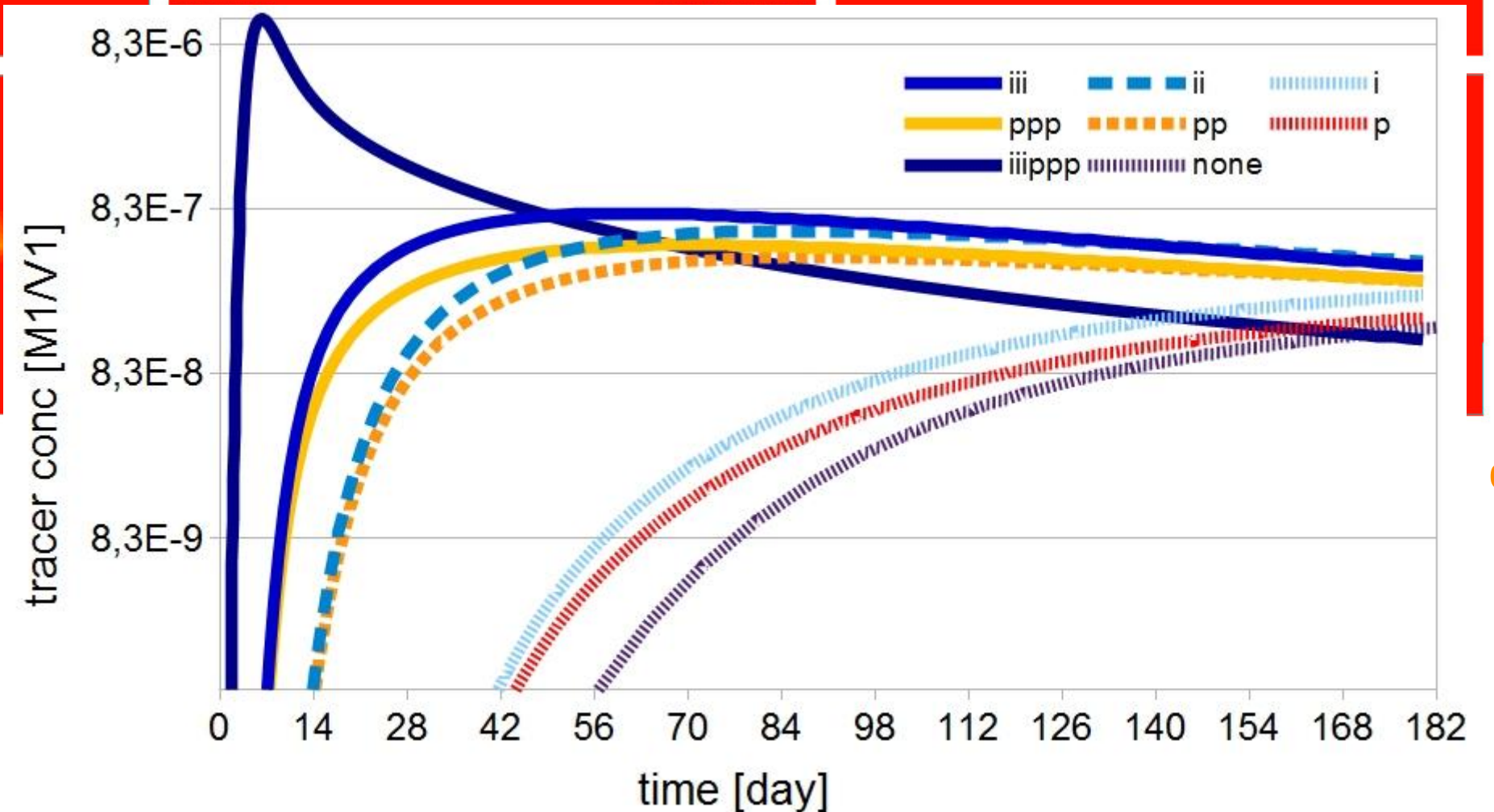
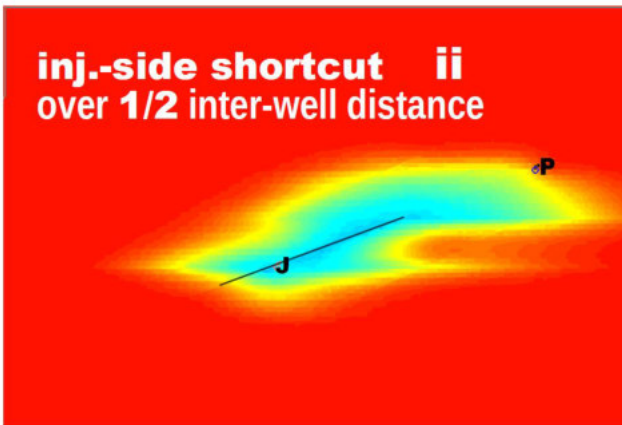
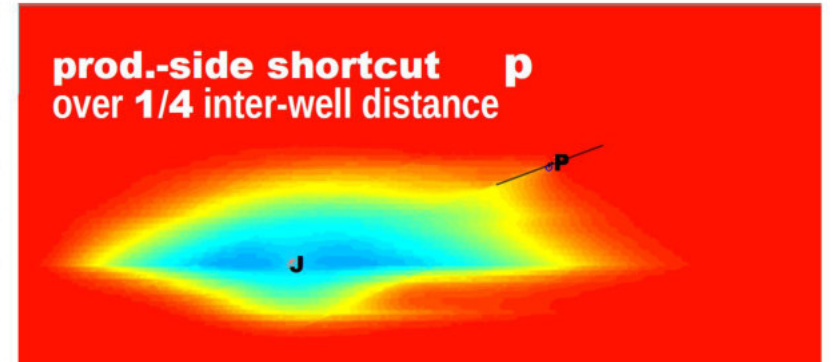
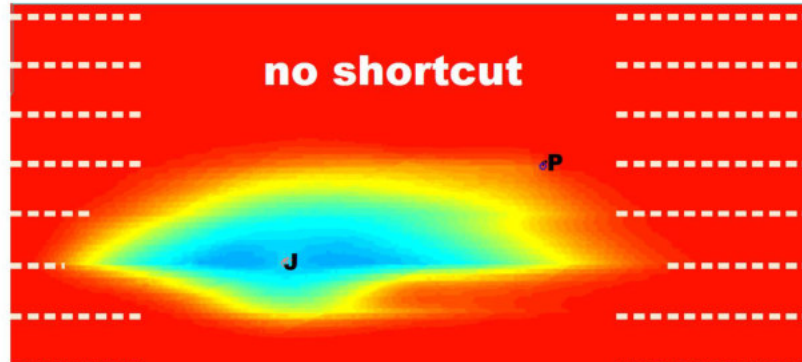
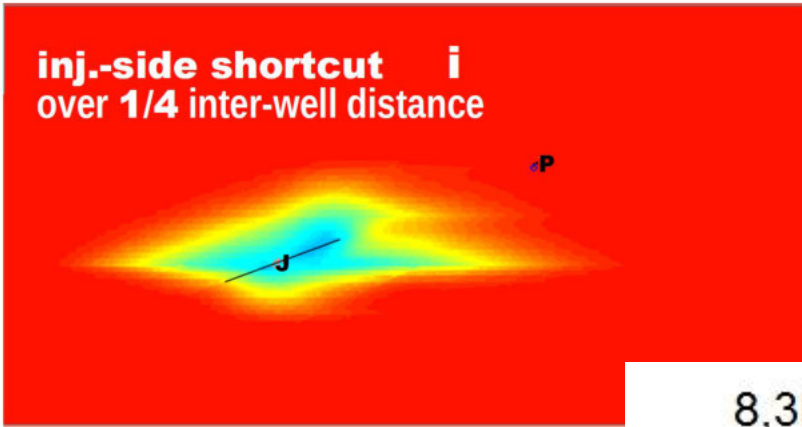
### Matrix region (x,z) with $C_{mat}(x,z) > 10^{-7} C_{inj}$ after two weeks



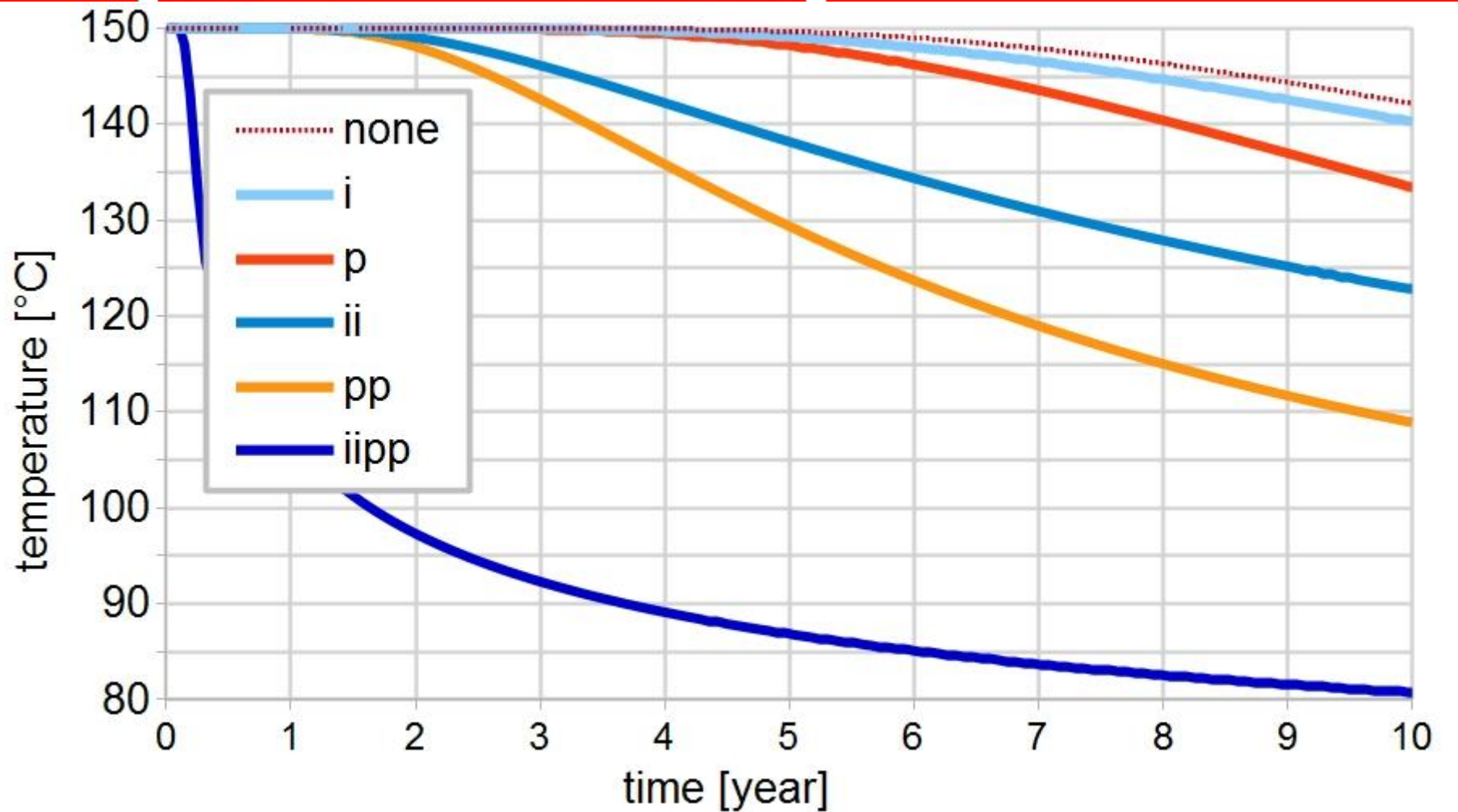
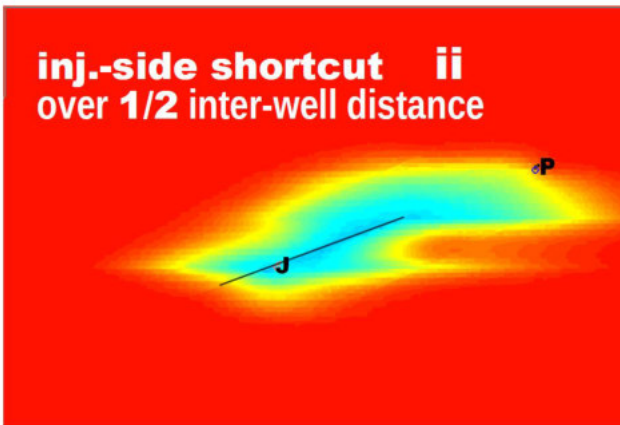
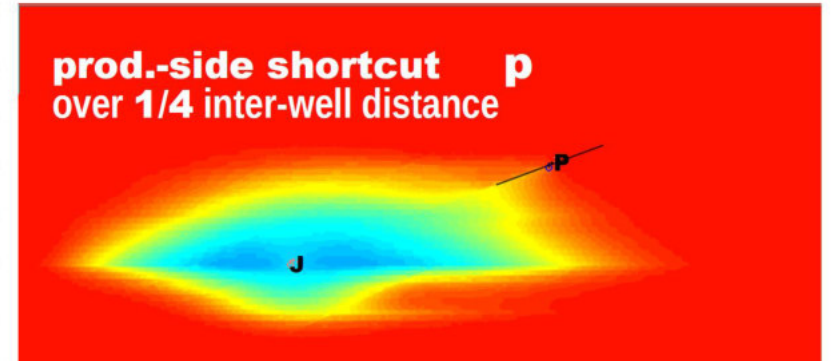
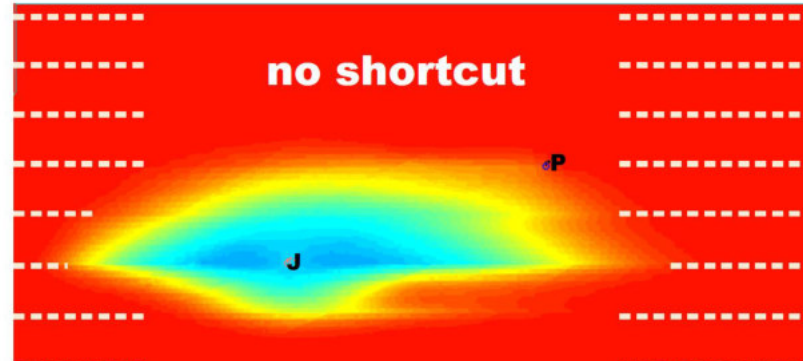
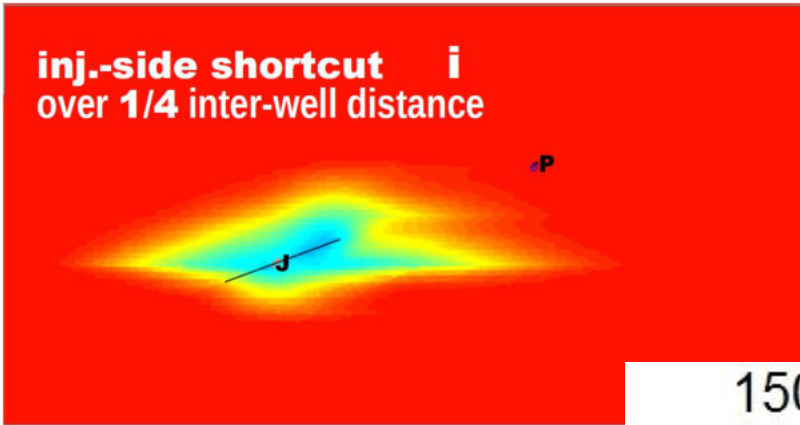
► Endo-push-pull

► 'Inversion'  
 FVZ → TL

Behrens, Ghergut, Sauter



- ▶▶ (S)SDV
- ▶▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ 'Inversion'  
FVZ → TL



- ▶▶ (S)SDV
- ▶▶ nanu ... ?
- ▶ Endo-push-pull
- ▶ **'Inversion'**  
FVZ → TL