

---

# Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken

Bernd Flemisch  
Felix Bode, Jürgen Braun

VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



---

## Übersicht

---

1. Motivation
2. Identifizierung relevanter Parameter
3. Eingesetzte Software und numerische Modelle
4. Erste Ergebnisse
5. Schadstofftransport
6. Zusammenfassung und Ausblick



Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



# Übersicht

---

1. Motivation
2. Identifizierung relevanter Parameter
3. Eingesetzte Software und numerische Modelle
4. Erste Ergebnisse
5. Schadstofftransport
6. Zusammenfassung und Ausblick



---

## Motivation

---

- Die Grundwassersanierung und -sicherung mit Hilfe der **Pump-and-Treat**-Technologie ist weit verbreitet.
- Für eine ökonomisch sinnvolle **Symbiose** zwischen geothermischer Nutzung und Sanierung müssen weitere Faktoren berücksichtigt werden.
- Die Durchflussrate ist direkt an den **Energiebedarf/-überschuss** des Verbrauchers gekoppelt.
- **Temperaturänderungen und -unterschiede** beeinflussen den durchströmten Aquiferbereich, die Lösungskinetik der Schadstoffe und die Mikrobiologie.
- Kann eine Steigerung der Aquifertemperatur die Notwendigkeit der Injektion zusätzlicher **Substrate** verhindern?



# Übersicht

---

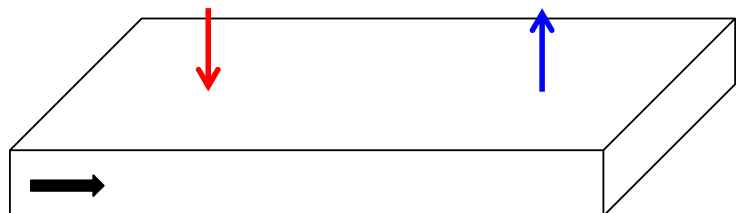
1. Motivation
2. Identifizierung relevanter Parameter
3. Eingesetzte Software und numerische Modelle
4. Erste Ergebnisse
5. Schadstofftransport
6. Zusammenfassung und Ausblick



## Basisszenario

---

- Offenes flaches geothermisches System.
- 100x50x10 Meter.
- $T_0 = 12^\circ\text{C}$ .
- $v_{x,0} = 0,2 \text{ m/d}$ .
- $k_x = 10^{-3} \text{ m/s}$
- $k_z / k_x = 1 / 5$ .
- $\lambda = 2,2 \text{ W/(m.K)}$ ,  $s = 1,8 \text{ MJ/(m}^3\text{.K)}$ .
- $T_{inj} = 16^\circ\text{C}$ .
- $q = 1,5 \text{ l/s}$ .
- RBen: Undurchlässig oben und unten, hydrostatischer Druck und Temperatur an den Seiten.



## Basisszenario

- Offenes flaches geothermisches System.
- 100x50x10 Meter.
- $T_0 = 12^\circ\text{C}$ .
- $v_{x,0} = 0,2 \text{ m/d}$ .
- $k_x = 10^{-3} \text{ m/s}$
- $k_z / k_x = 1 / 5$ .
- $\lambda = 2,2 \text{ W/(m.K)}$ ,  $s = 1,8 \text{ MJ/(m}^3\text{.K)}$ .
- $T_{\text{inj}} = 16^\circ\text{C}$ .
- $q = 1,5 \text{ l/s}$ .
- RBen: Undurchlässig oben und unten, hydrostatischer Druck und Temperatur an den Seiten.



## Variation der Parameter

Parameter	Einheit	Basiswert	Maximalwert	Minimalwert
$k_x$	m/s	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-6}$
$k_z / k_x$	-	1/5	1/1	1/50
$v_{x,0}$	m/d	0,2	1	0,02
$q$	l/s	1,5	15	0,15
$T_{\text{inj}}$	$^\circ\text{C}$	16	22	14
$\lambda$	W/(m.K)	2,2	3,0	1,5
$s$	MJ/(m <sup>3</sup> .K)	1,8	2,5	0,8



# Übersicht

---

1. Motivation
2. Identifizierung relevanter Parameter
3. **Eingesetzte Software und numerische Modelle**
4. Erste Ergebnisse
5. Schadstofftransport
6. Zusammenfassung und Ausblick

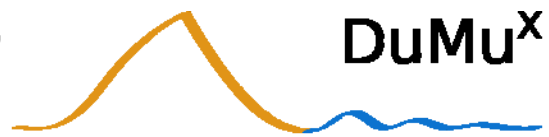


---

## Eingesetzte Software

---

- Poröse-Medien-Simulator **DuMu<sup>x</sup>**,  
[www.dumux.org](http://www.dumux.org).
- Seit 2007 am **LH2** entwickelt.
- Basis: Distributed and Unified Numerics Environment **DUNE**.
- **Numerische Modelle** von stationärer isothermer Einphasen-Grundwasserströmung bis hin zu zeitabhängigen nichtisothermen Mehrphasen-Mehrkomponenten-Szenarien.
- Bisheriger Einsatz vorrangig in **Forschung und Lehre**.
- Beginnende erfolgreiche **Industriekooperationen**.
- **Open-Source**-Prinzip unter der GNU General Public License.



## Verwendetes Numerisches Modell

---

- **Nichtisothermes nichtmischbares** Zweiphasenmodell  $2p1i$ .
- **Voll implizite** Diskretisierung der Bilanzen für Phasenmassen und Energie.
- **Ortsdiskretisierung**: Boxmethode (CVFE-Verfahren).
- Adaptive **Zeitschrittweitensteuerung**.
- Linearisierung: **Newtonverfahren**.
- Lösen der linearen Gleichungssysteme: **ILU**-vorkonditioniertes **BiCGSTAB**-Verfahren.
- **Später**: mischbar  $2p2cni$  bis  $MpNcni$ .



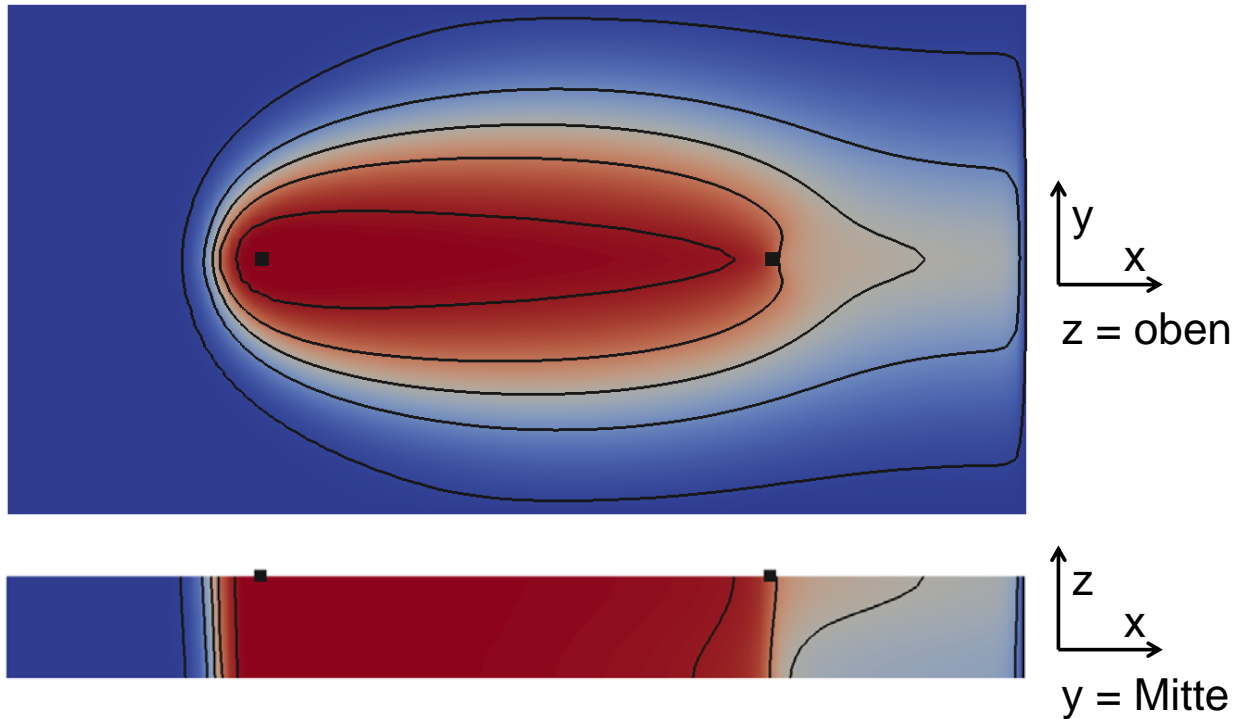
## Übersicht

---

1. Motivation
2. Identifizierung relevanter Parameter
3. Eingesetzte Software und numerische Modelle
4. **Erste Ergebnisse**
5. Schadstofftransport
6. Zusammenfassung und Ausblick



## Ergebnisse: Temperaturfeld für das Basisszenario



Universität Stuttgart

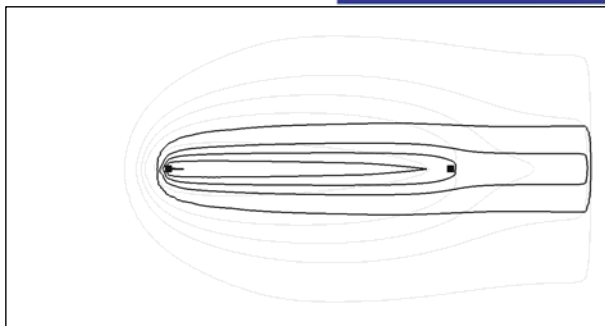
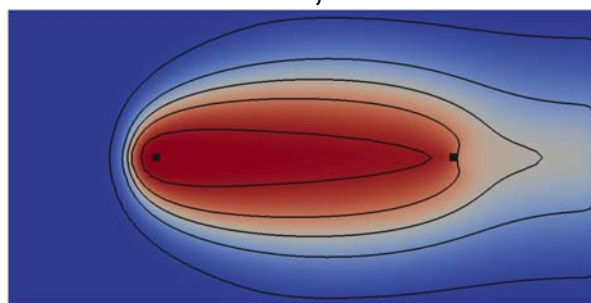
IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart

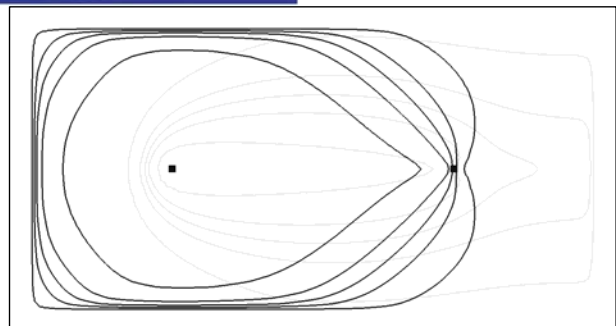


## Ergebnisse: Variation der Fließgeschwindigkeit

Basis: 0,2 m/d



Max: 1 m/d



Min: 0,02 m/d



Universität Stuttgart

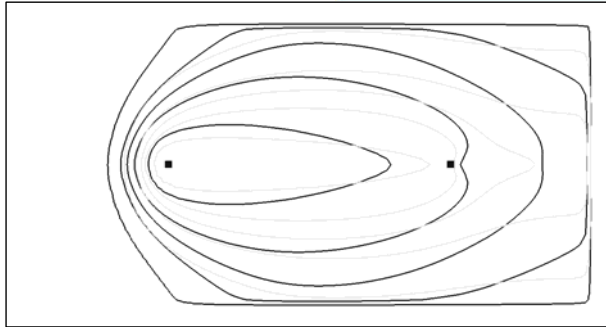
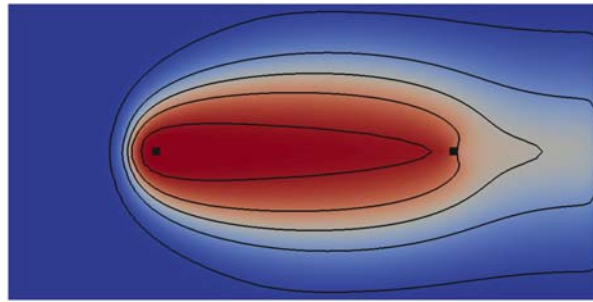
IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart

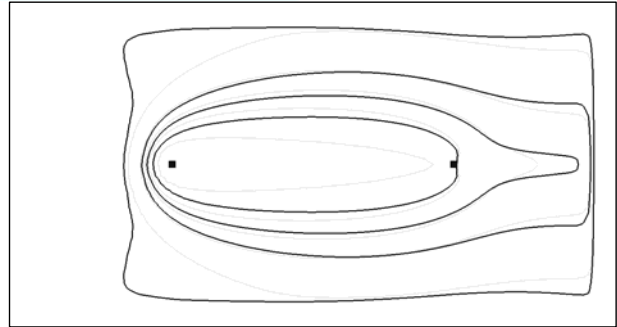


## Ergebnisse: Variation der Leitfähigkeit

Basis:  $10^{-3}$  m/s



Max:  $10^{-2}$  m/s



Min:  $10^{-6}$  m/s



Universität Stuttgart

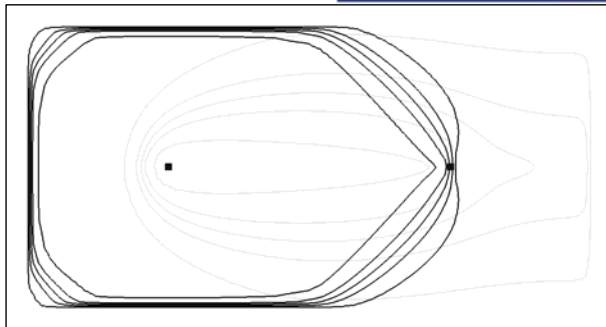
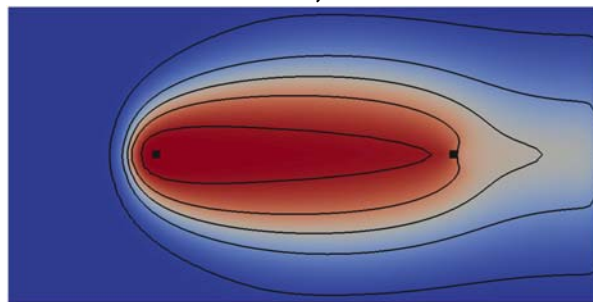
IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart

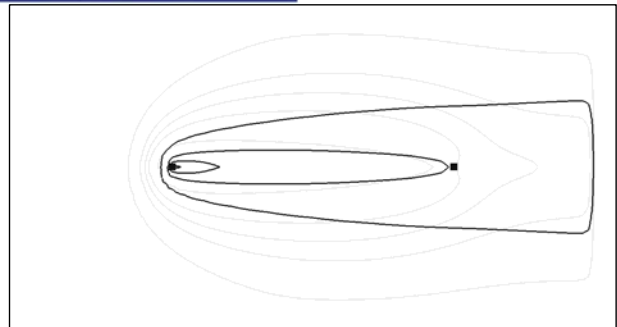


## Ergebnisse: Variation der Pumprate

Basis: 1,5 l/s



Max: 15 l/s



Min: 0,15 l/s



Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

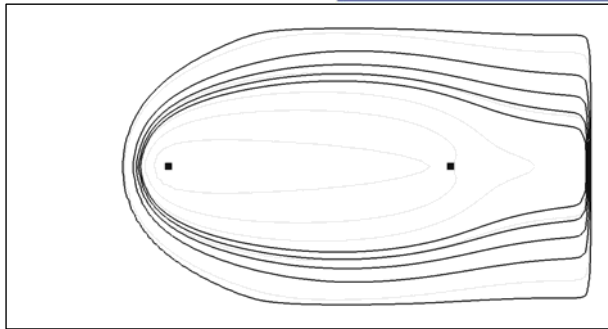
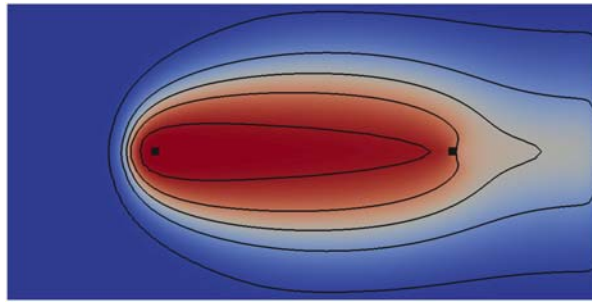
Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



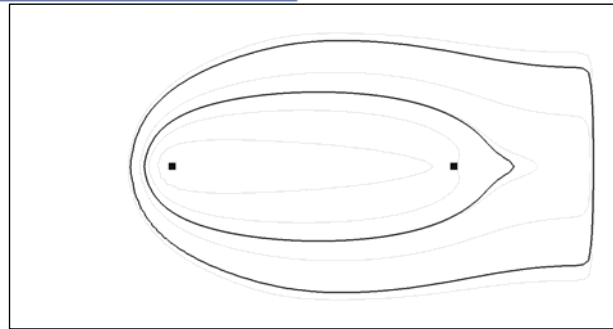


## Ergebnisse: Variation der Injektionstemperatur

Basis: 16 °C



Max: 22 °C



Min: 14 °C



Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



## Ergebnisse: Zusammenfassung

- **Signifikanten Einfluss** besitzen  $v_{x,0}$ ,  $k_x$ ,  $q$ ,  $T_{inj}$ .
- Die Größen  $k_z/k_x$ ,  $s$  besitzen **kaum Einfluss**.
- Änderungen von  $v_{x,0}$  und  $q$  haben einen deutlichen Einfluss auf die Art der Ausbreitung: **radial** um die Brunnen oder **parallel** zum Hintergrundfluss.
- Relativ geringer Einfluss von **Gravitation**.
- (Zu) großer Einfluss der **Randbedingungen**.
- Die Änderung von  $T_{inj}$  besitzt erwartungsgemäß große Auswirkungen auf das Temperatur- und kaum welche auf das Geschwindigkeitsfeld.
- Energieeffizienz kann nur durch eine **optimale Kombination** von  $q$  und  $T_{inj}$  erreicht werden.



Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



# Übersicht

1. Motivation
2. Identifizierung relevanter Parameter
3. Eingesetzte Software und numerische Modelle
4. Erste Ergebnisse
5. Schadstofftransport
6. Zusammenfassung und Ausblick



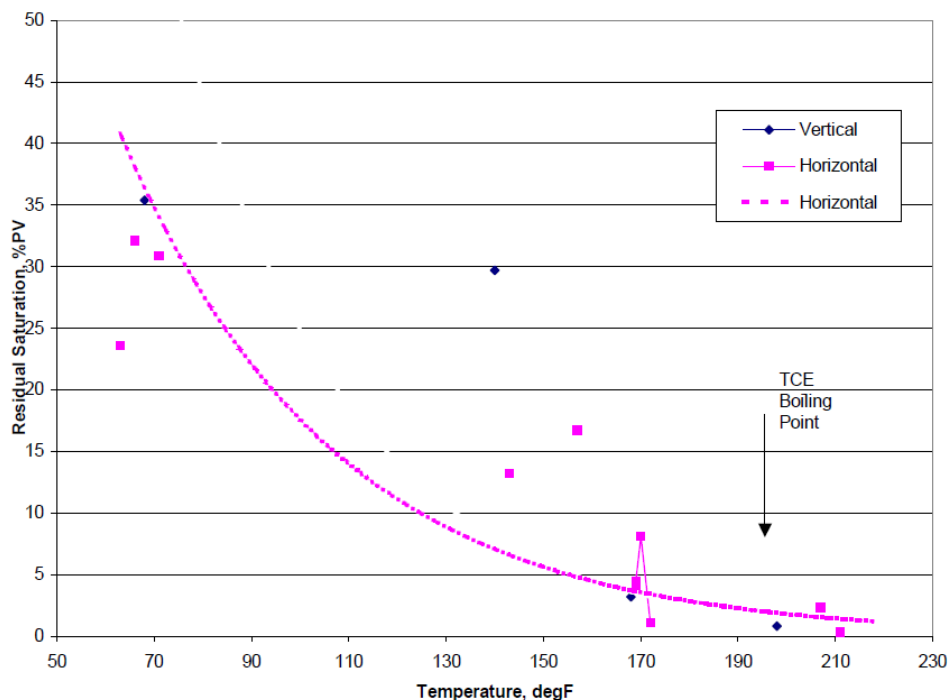
Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



## TCE: Residualsättigung vs. Temperatur



[L. Johnson, Western Reserach Institute, Laramie, Wyoming, 2003]



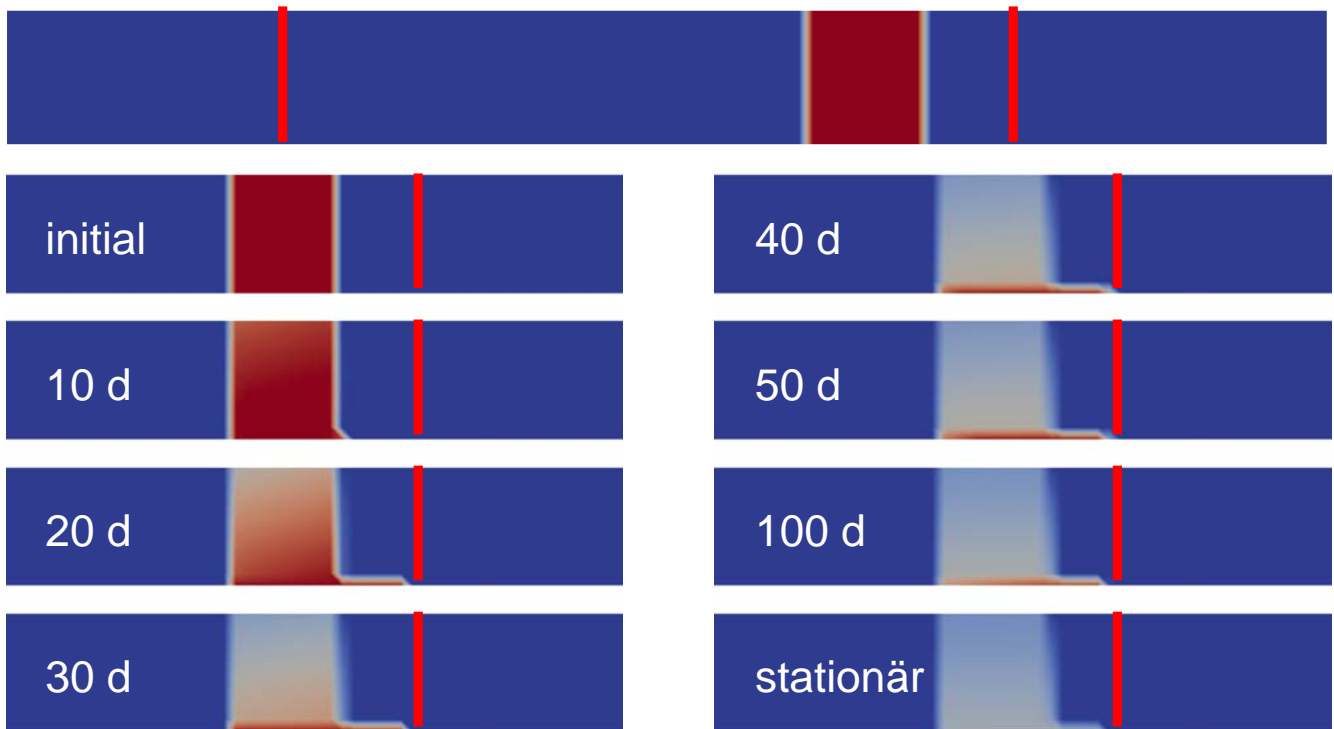
Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



## Schadstofftransport: Snapshots, $\epsilon T = 20^\circ\text{C}$



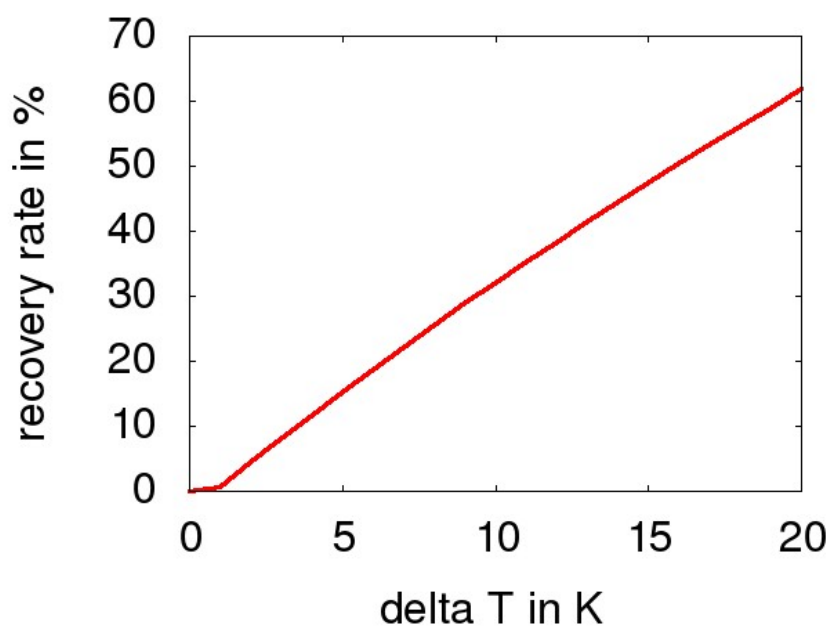
Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



## Schadstofftransport: Rückgewinnungsrate



Universität Stuttgart

IWS, Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Thermisch genutzte P&T-Anlagen – Chancen und Risiken, VEGAS-Kolloquium 2011, Stuttgart



# Übersicht

---

1. Motivation
2. Identifizierung relevanter Parameter
3. Eingesetzte Software und numerische Modelle
4. Erste Ergebnisse
5. Schadstofftransport
6. Zusammenfassung und Ausblick



---

## Zusammenfassung und Ausblick

---

- **Erste Schritte** zur Untersuchung der Potenziale und Risiken thermisch genutzter P&T-Anlagen wurden unternommen.
- Die Auswirkungen typischer **Parameter** auf das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld wurden untersucht.
- Einbeziehung **temperaturabhängiger Residualsättigung** in die Simulation der Schadstoffausbreitung.
- Eine rigorose **Quantifizierung** des Parametereinflusses ist erforderlich.
- Eine weitergehende experimentelle Bestimmung **konstitutiver Beziehungen** ist notwendig.
- Hinzunahme weiterer relevanter Effekte durch Erhöhung der **Modellkomplexität**.

