

Baryt-Fällungspotenzial modelliert für Niedrigenthalpie-Geothermieranlagen

Morgan Tranter^{1, 2, *} Marco De Lucia¹ Markus Wolfgramm³ Michael Kühn^{1,2}

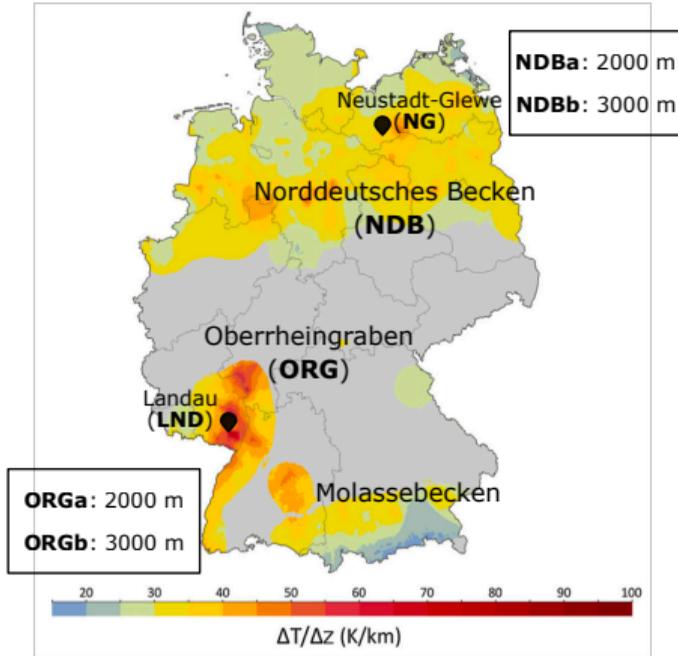
¹Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Sektion Fluidsystemmodellierung, Potsdam
²Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, Potsdam
³Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG)

*Kontakt: mtranter@gfz-potsdam.de

13. November 2020

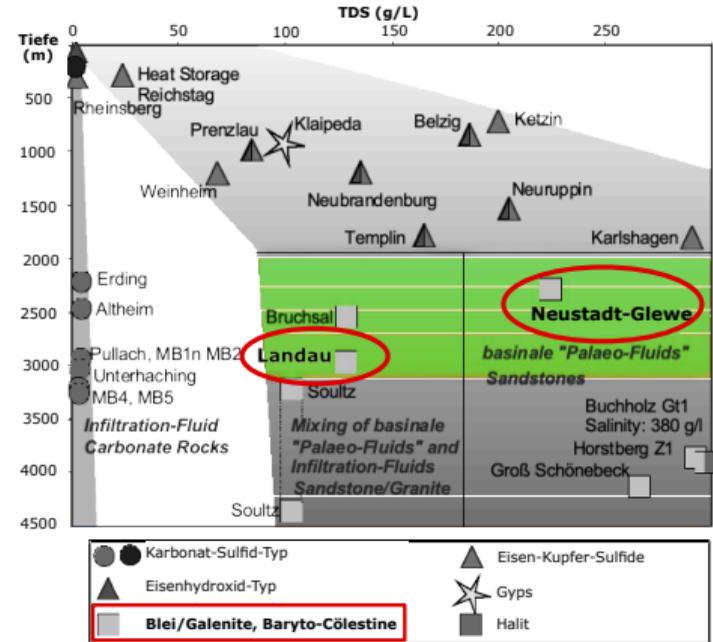


Mineralausfällungen aus hochsalinaren Formationswässern stellen eine massive Gefahr für den langfristigen Betrieb dar



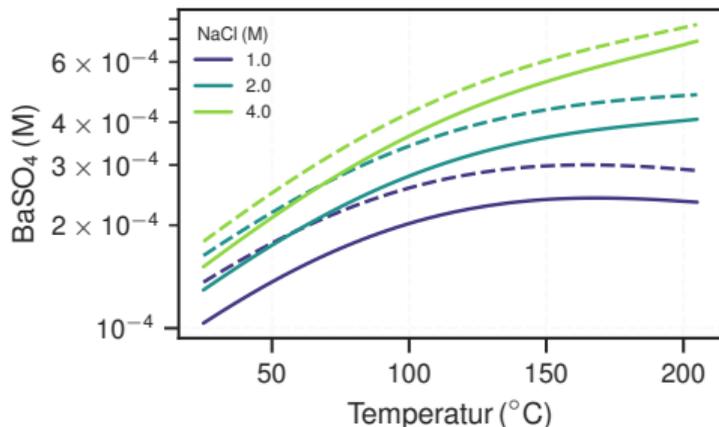
Agemar et al. 2012 (verändert)

Scale-Typen in Geothermieranlagen



Wolfgramm et al. 2011 (verändert)

Baryt-Fällungen sind wegen ihres häufigen Vorkommens und der geringen Löslichkeit von Bariumsulfat von besonderer Bedeutung



- ▶ Löslichkeit ist prograd temperaturabhängig
- ▶ Salinare Tiefenwässer vorwiegend gesättigt mit Bariumsulfat
- ▶ Geringe Löslichkeit zwischen 10 μM und 200 μM bei 25 °C (2 bis 40 mg/kg Wasser)
- ▶ Säurebeständig und Rücklösung kaum möglich

Jeweils für $P = 10$ bar (durchgezogen) und $P = 500$ bar (gestrichelt) berechnet.

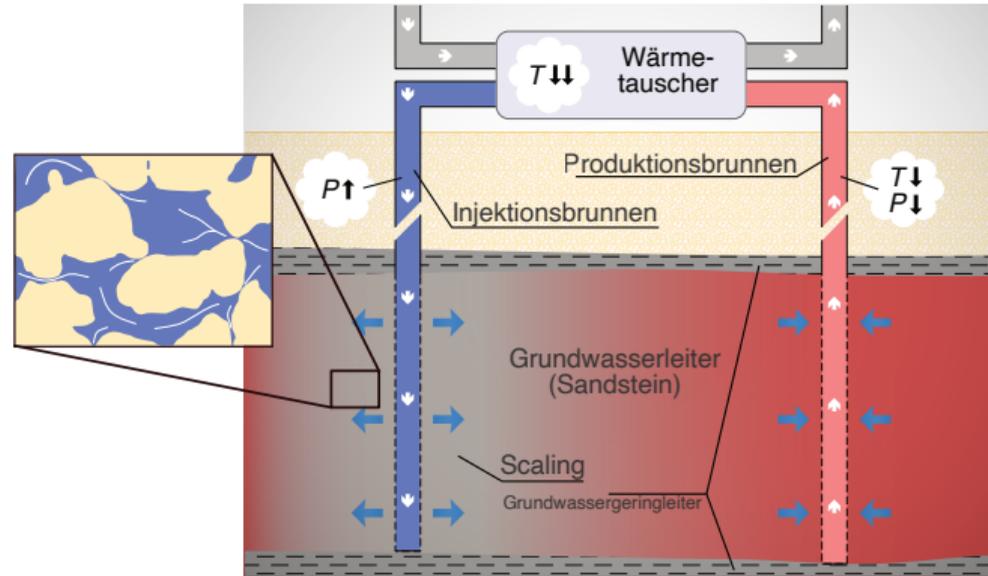
Tranter et al. 2020

Injektion übersättigter Fluide in Reservoir resultiert in Mineralausfällung und einem Injektivitätsverlust

Reservoir-Parameter (Grundszenario)

| Q ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) | K (mD) | M (m) | ϕ (-) | T_{inj} ($^{\circ}\text{C}$) | w_{Baryt} (%) |
|---------------------------------------|-------------|------------|---------------|--|---------------------------|
| 100 | 500 | 20 | 0.2 | 55 | 0.1 |

- ▶ Irreversible Änderung der Gebirgseigenschaften
- ▶ Wie groß ist der erwartete Injektivitätsverlust durch Baryt-Fällung?



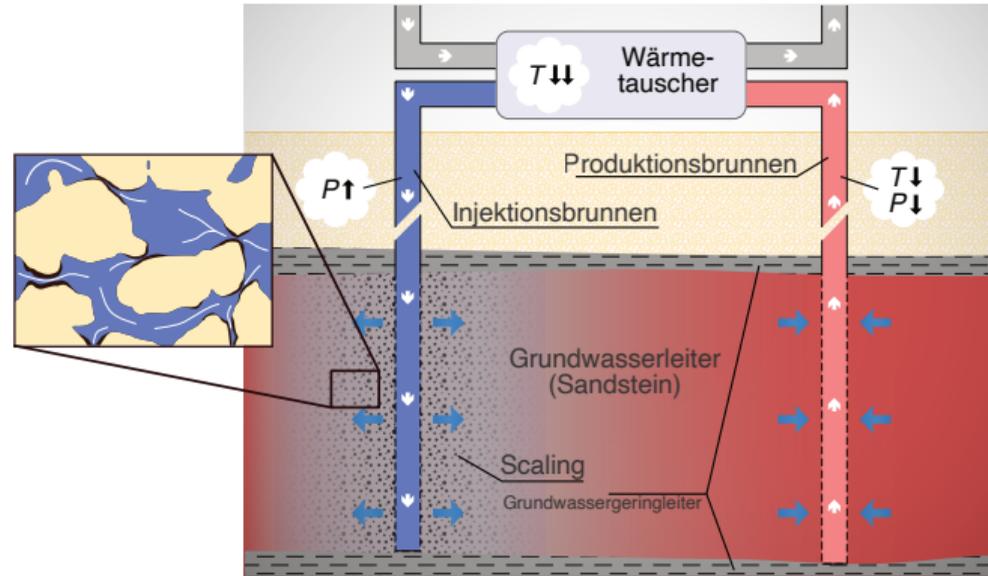
Tranter et al. 2020

Injektion übersättigter Fluide in Reservoir resultiert in Mineralausfällung und einem Injektivitätsverlust

Reservoir-Parameter (Grundszenario)

| Q ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) | K (mD) | M (m) | ϕ (-) | T_{inj} ($^{\circ}\text{C}$) | w_{Baryt} (%) |
|---------------------------------------|-------------|------------|---------------|--|---------------------------|
| 100 | 500 | 20 | 0.2 | 55 | 0.1 |

- ▶ Irreversible Änderung der Gebirgseigenschaften
- ▶ Wie groß ist der erwartete Injektivitätsverlust durch Baryt-Fällung?



Tranter et al. 2020

Injektion übersättigter Fluide in Reservoir resultiert in Mineralausfällung und einem Injektivitätsverlust

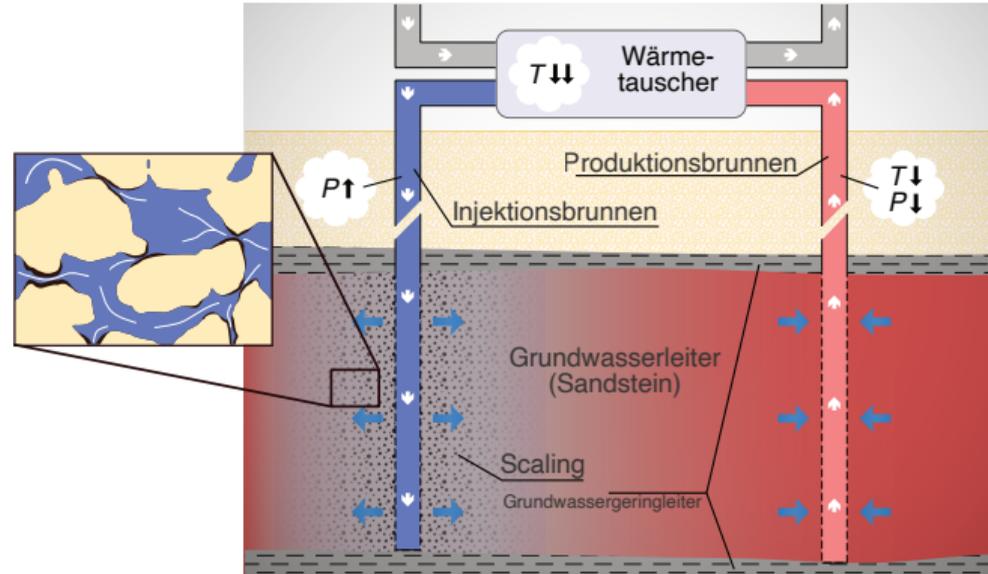
Reservoir-Parameter (Grundszenario)

| Q ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) | K (mD) | M (m) | ϕ (-) | T_{inj} ($^{\circ}\text{C}$) | w_{Baryt} (%) |
|---------------------------------------|-------------|------------|---------------|--|---------------------------|
| 100 | 500 | 20 | 0.2 | 55 | 0.1 |

- ▶ Irreversible Änderung der Gebirgseigenschaften
- ▶ Wie groß ist der erwartete Injektivitätsverlust durch **Baryt-Fällung**?

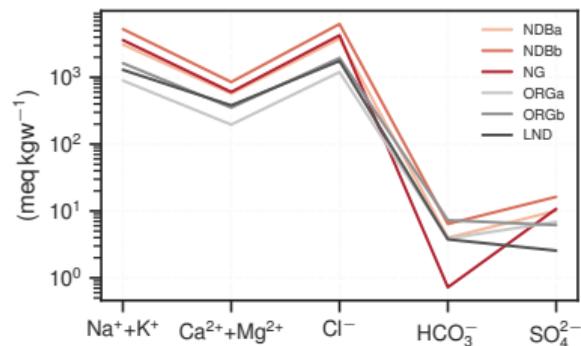
Szenarien der Sensitivitätsanalyse

| Szenario | Parameter | Wert | Einheit |
|---------------------------------------|--------------------|------|----------------------------|
| $T_{\text{inj}} + 10^{\circ}\text{C}$ | T | 65 | $^{\circ}\text{C}$ |
| $T_{\text{inj}} - 10^{\circ}\text{C}$ | T | 45 | $^{\circ}\text{C}$ |
| $Q/2$ | Q | 50 | $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ |
| $R/10$ | w_{Baryt} | 0.01 | % |



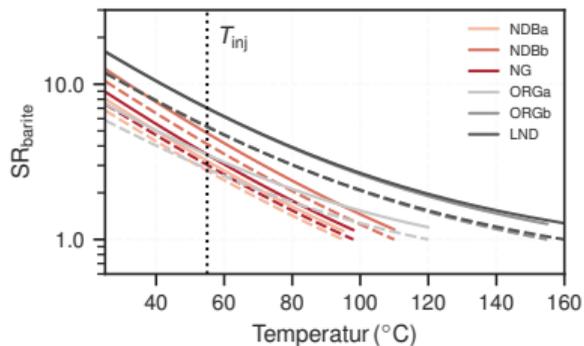
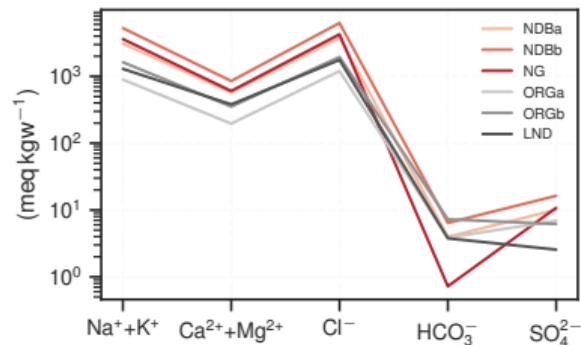
Tranter et al. 2020

Fällungspotenzial ist standortspezifisch und hängt von Reservoirbedingungen und Solenzusammensetzung ab



- ▶ Na-Cl / Na-Ca-Cl Wassertypen
- ▶ Wasser im NDB höher mineralisiert als im ORG
- ▶ dT höher im ORG als im NDB ($dT = T_{res} - T_{inj}$)
- ▶ Erwartete Übersättigung höher für
 - ▶ Reservoiren im ORG
 - ▶ tiefen Reservoiren

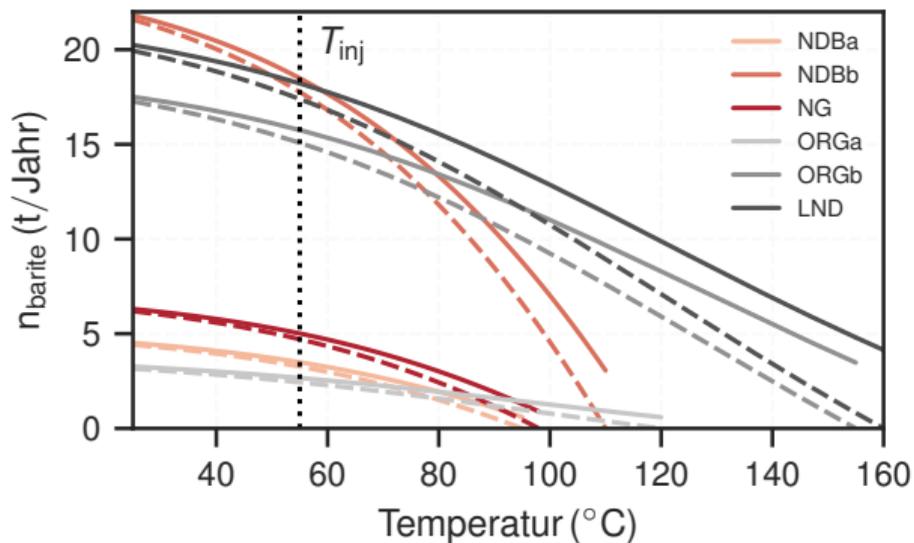
Fällungspotenzial ist standortspezifisch und hängt von Reservoirbedingungen und Solenzusammensetzung ab



Tranter et al. 2020

- ▶ Na-Cl / Na-Ca-Cl Wassertypen
- ▶ Wasser im NDB höher mineralisiert als im ORG
- ▶ dT höher im ORG als im NDB ($dT = T_{res} - T_{inj}$)
- ▶ Erwartete **Übersättigung** höher für
 - ▶ Reservoiren im ORG
 - ▶ tiefen Reservoiren

Beide Regionen weisen bei gleicher Reservoirtiefe ein ähnlich hohes Fällungspotenzial von Baryt auf

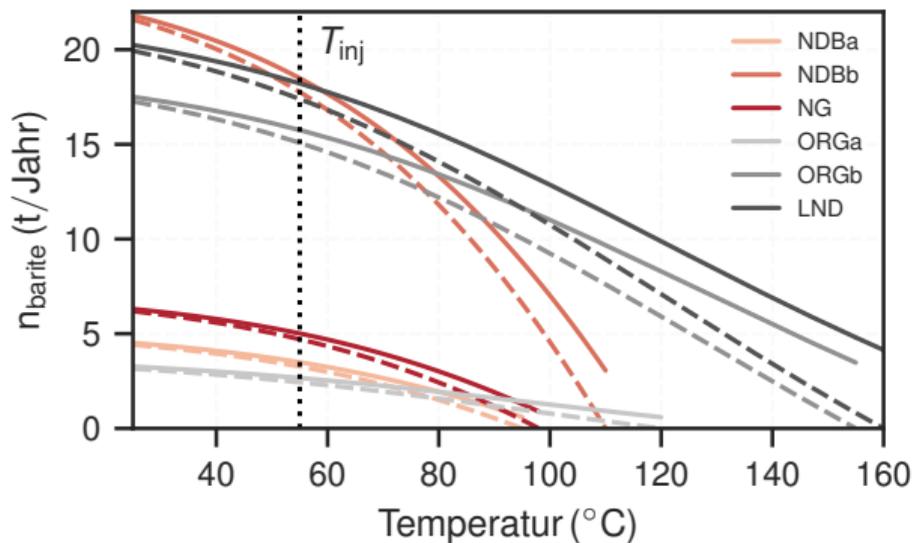


Thermodynamisches Gleichgewicht, $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$.

Durchgezogene Linie berücksichtigt Druckabfall bei Produktion.

Tranter et al. 2020

Beide Regionen weisen bei gleicher Reservoirtiefe ein ähnlich hohes Fällungspotenzial von Baryt auf



- ▶ Gleichgewichtsmodelle liefern nur absolute Mengen
- ▶ Keine Aussage über Einfluss auf Injektivität möglich
- ▶ Berücksichtigung der Kinetik notwendig

Thermodynamisches Gleichgewicht, $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$.
Durchgezogene Linie berücksichtigt Druckabfall bei Produktion.

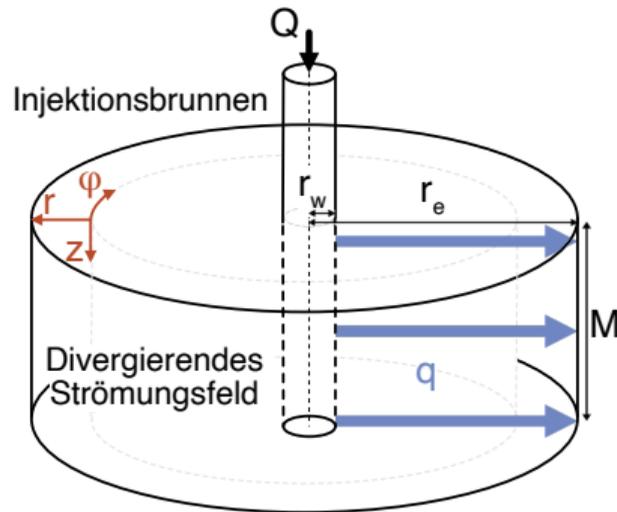
Tranter et al. 2020

Strömungsfeld und Reaktionskinetik bestimmen die räumliche und zeitliche Verteilung der Fällung um die Bohrung

Transportgleichung

Stationäre Advektions-Reaktions-Gleichung für ein radialsymmetrisch-divergierendes Strömungsfeld

$$\frac{Q}{2\pi M\phi} \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + R = 0$$



Strömungsfeld und Reaktionskinetik bestimmen die räumliche und zeitliche Verteilung der Fällung um die Bohrung

Transportgleichung

Stationäre Advektions-Reaktions-Gleichung für ein radialsymmetrisch-divergierendes Strömungsfeld

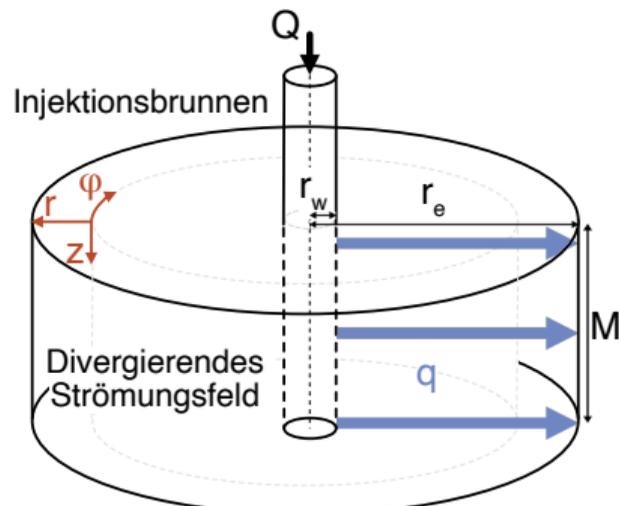
$$\frac{Q}{2\pi M\phi} \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + R = 0$$

Reaktionsgleichung

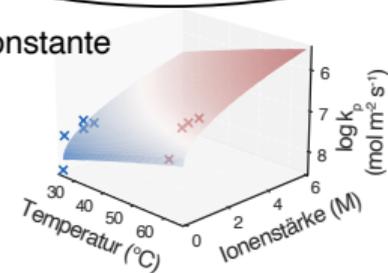
Fällungskinetik von Baryt

$$R = \frac{dm}{dt} = SA k_p (1 - SR)^n$$

$$k_p = f(T, IS)$$



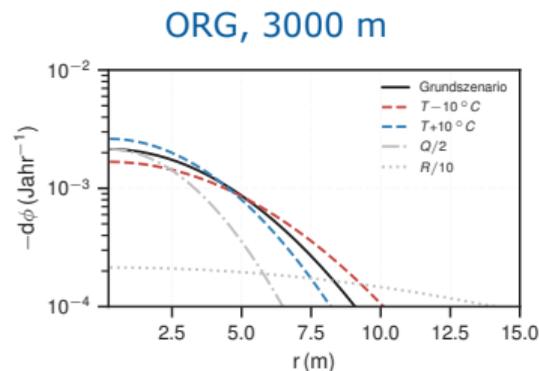
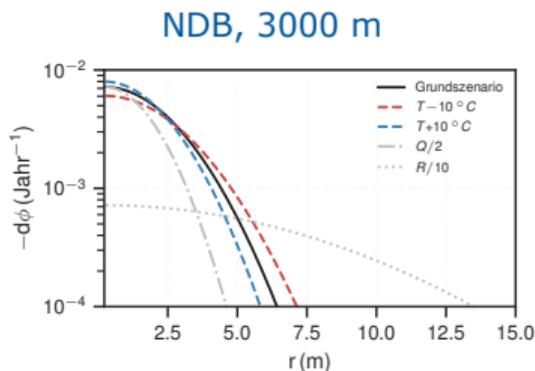
Ratenkonstante



Injektivitätsverlust bis zu 64% innerhalb von zehn Jahren durch Baryt-Fällung in tiefen Reservoiren des NDB

Berechnung des Injektivitätsverlust

- 1 Porositätsabnahme durch Fällung ($d\phi$)
- 2 Permeabilitätsreduktion nach Kozeny-Carman
- 3 Verlust an Gebirgsdurchlässigkeit ($1 - \bar{K}/K_0$)

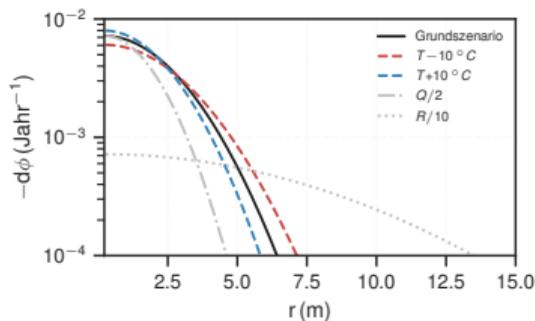


Injektivitätsverlust bis zu 64% innerhalb von zehn Jahren durch Baryt-Fällung in tiefen Reservoiren des NDB

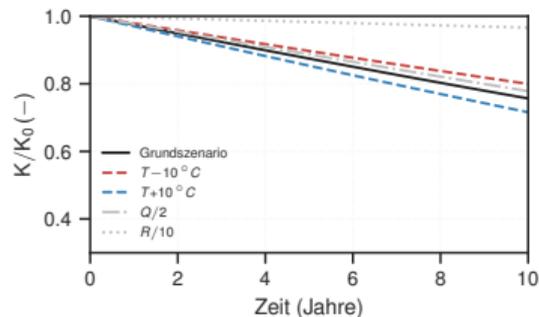
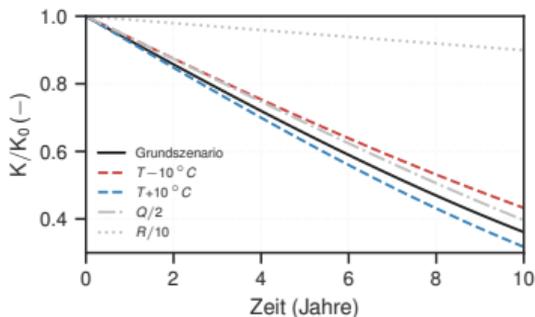
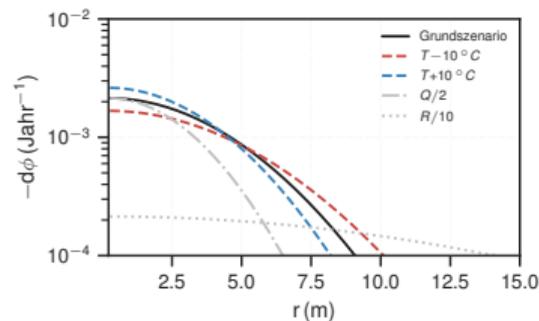
Berechnung des Injektivitätsverlust

- 1 Porositätsabnahme durch Fällung ($d\phi$)
- 2 Permeabilitätsreduktion nach Kozeny-Carman
- 3 Verlust an Gebirgsdurchlässigkeit ($1 - \bar{K}/K_0$)

NDB, 3000 m



ORG, 3000 m



Verlauf der stationären Konzentrationsverteilung im Reservoir mit Damköhler-Zahl beschrieben

Dimensionslose Beschreibung

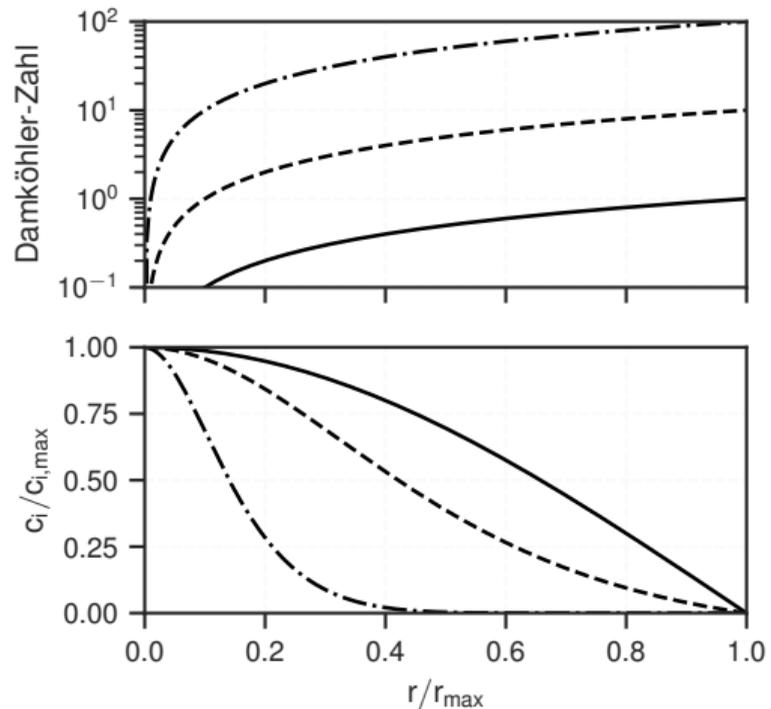
Damköhler-Zahl

$$Da(r) = \frac{rr_c}{V} \frac{R}{\phi c_{i,eq}}$$

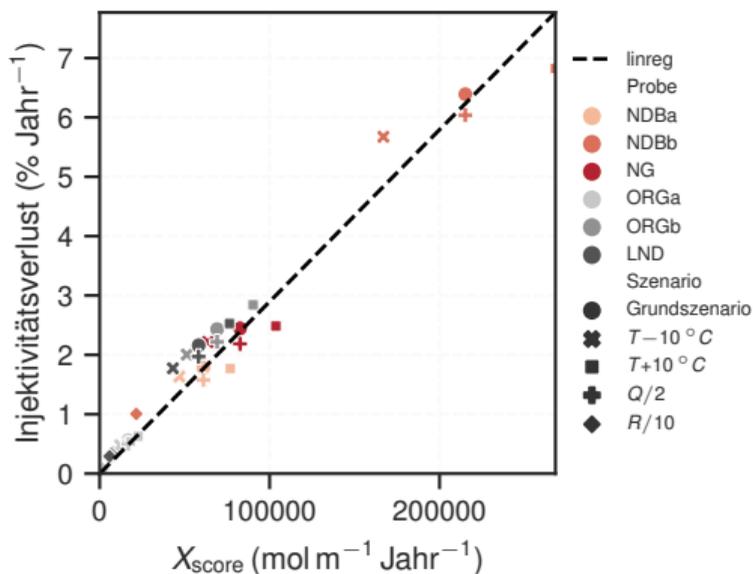
Unter Annahme von homogenen Bedingungen, nimmt Da mit r linear zu.

$$m_{Da} = \frac{r_c}{V} \frac{R}{\phi c_{i,eq}}$$

→ Je höher m_{Da} , desto größer der Einfluss der Fällung auf die Injektivität.



Neuer Scaling-Score schätzt zeitlichen Injektivitätsverlust ab und ist auf andere Geothermieprojekte übertragbar



Tranter et al. 2020

Scaling-Score

$$X_{\text{score}} = m_{\text{Da}} \cdot n_{\text{Baryt}} \cdot Q$$

Kalibrierung mit Ergebnissen aus Simulationen:

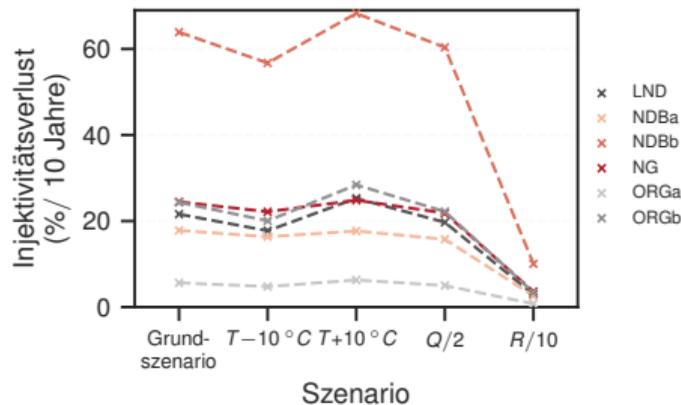
$$\text{Verlust (\%/Jahr)} = 2.89 \cdot 10^{-5} \cdot X_{\text{score}}$$

→ Auf ähnliche Fällungsreaktionen (z.B. Silikat-Scales) übertragbar.

Tiefenabhängiges Fällungspotenzial in NDB und ORG vergleichbar, doch Injektivitätsverlust im NDB deutlich gravierender

Kernpunkte

- ▶ Hochsalinare Solen im NDB haben hohe **Ratenkonstanten** zur Folge
- ▶ Änderung der **Injektionstemperatur** hat geringen Einfluss (kompensierender Effekt)
- ▶ **Barytanteil** im Formationsgestein sehr wichtig, aber oft nicht hinreichend bekannt
- ▶ **Scaling-Score** bietet eine direkte Möglichkeit, den Injektivitätsverlust mit wenigen Parameter abzuschätzen



| Szenario | Parameter | Wert | Einheit |
|--------------------------------|--------------------|------|----------------------------|
| $T_{inj} + 10^{\circ}\text{C}$ | T | 65 | $^{\circ}\text{C}$ |
| $T_{inj} - 10^{\circ}\text{C}$ | T | 45 | $^{\circ}\text{C}$ |
| $Q/2$ | Q | 50 | $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ |
| $R/10$ | w_{Baryt} | 0.01 | % |

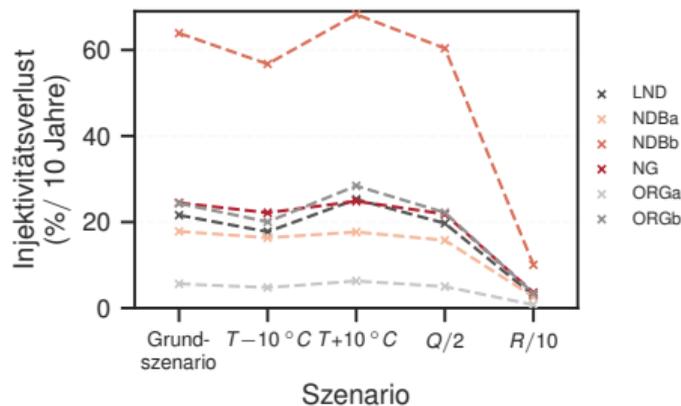
Tiefenabhängiges Fällungspotenzial in NDB und ORG vergleichbar, doch Injektivitätsverlust im NDB deutlich gravierender

Kernpunkte

- ▶ Hochsalinare Solen im NDB haben hohe **Ratenkonstanten** zur Folge
- ▶ Änderung der **Injektionstemperatur** hat geringen Einfluss (kompensierender Effekt)
- ▶ **Barytanteil** im Formationsgestein sehr wichtig, aber oft nicht hinreichend bekannt
- ▶ **Scaling-Score** bietet eine direkte Möglichkeit, den Injektivitätsverlust mit wenigen Parameter abzuschätzen

Nähere Informationen

Tranter et al. Water 12, 3078 (2020).
<https://doi.org/10.3390/w12113078>.



| Szenario | Parameter | Wert | Einheit |
|--|--------------------|------|-----------------------------|
| $T_{inj} + 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ | T | 65 | $^\circ\text{C}$ |
| $T_{inj} - 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ | T | 45 | $^\circ\text{C}$ |
| Q/2 | Q | 50 | $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ |
| R/10 | w _{Baryt} | 0.01 | % |